

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Nová metodika vyhodnocování mechanických vlastností u vzorků
po procesu ECAP

New Methodology Scoring Mechanical Properties in Patterns after
ECAP Process

Student: Petr Bobek

Vedoucí ročníkového projektu: prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Bobek**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie

Specializace: 70 Strojírenská technologie

Téma: **Nová metodika vyhodnocování mechanických vlastností u vzorků po procesu ECAP**
New Methodology Scoring Mechanical Properties in Patterns after ECAP Process

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu vývoje technologií zjemňování struktury u kovových materiálů se zaměřením na proces ECAP.
- 2) Analyzujte používané metody vyhodnocování mechanických vlastností a tváritelnosti pro rozměrově klasické vzorky a pro krátké vzorky po procesu ECAP.
- 3) Proveďte vyhodnocení mechanických vlastností u slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn u krátkých vzorků po procesu ECAP. Analyzujte vliv počtu průchodů.
- 4) Proveďte analýzu mechanických vlastností penetrační metodou u obou slitin.
- 5) Výsledky srovnajte s mechanickými vlastnostmi dosaženými tahovou zkouškou u krátkých vzorků.
- 6) Proveďte celkové vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) FURUKAWA, M., HORITA, Z., LANGDON, H. G. Factors influencing the shearing patterns in equal-channel angular pressing, *Materials Science and Engineering*. 2002, A332 p. 97-109.
- 2) SRINIVASAN R., CHAUDHUR P. K., CHERUKURI B., HAN Q., SWENSON D., GROS P. *Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys*, Final Technical Report, DOE Award Number: DE-FC36-01ID14022, 2006, p. 1- 68.
- 3) YOON, S. CH., JEONG, Y. G., HONG, S. I., CHUN, B. S., LEE, H. R., BAIK, K. H., KIM, H. S. Processing Conditions and Mechanical Properties of Fine Grained Mg by Equal Channel Angular Pressing, *Key Engineering Materials*, Vols. 340-341, 913 (2007), p. 913-917.
- 4) MACEK, K. a kol. *Experimentální metody v materiálovém inženýrství*. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2008
- 5) MÍŠEK, B., PTÁČEK, L. *Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení*. SNTL, 1983
- 6) <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/mechanicke-zkouseni-kovu-m10507-p3.html>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.**


Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2011

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářský projekt bude v elektronické podobě uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářská práce nebo poskytnout licenci k jeho využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2011

.....
Podpis

Jméno a příjmení autora projektu: Petr Bobek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Střítež 231

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BOBEK, P. *Nová metodika vyhodnocování mechanických vlastností u vzorků po procesu ECAP: Bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 50 s. Vedoucí práce: Ruzs, S.

Bakalářská práce se zabývá současnou metodikou zjemňování struktury kovových materiálů se zaměřením na proces ECAP. V úvodu naleznete přehled současných metod, které se podílí na procesu zjemňování struktury materiálů. V experimentální části jsou analyzovány metody vyhodnocování mechanických vlastností jak u klasických, tak i krátkých vzorků. U krátkých vzorků slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn jsou vyhodnoceny mechanické vlastnosti penetrační metodou a vliv počtu průchodů na strukturu protlačované slitiny. V závěru jsou mechanické vlastnosti krátkých vzorků obou slitin porovnány s tahovou zkouškou.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BOBEK, P. *New Methodology Scoring Mechanical Properties in Patterns after ECAP Process : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2011, 50 p. Thesis head: Ruzs, S.

The thesis deals with the current refining the structure of metallic materials methodology with the focus on the process of ECAP. The introduction offers an overview of current methods, which are involved in the process of refining the structure of materials. In the experimental section there are analyzed methods to evaluate mechanical properties of both classical and short samples. The mechanical properties of short samples of alloys AlMn1Cu AlFe1, 5Mn are evaluated by the method of penetration and the effect of the number of passage on the structure of the extruded alloy. In the conclusion, the mechanical properties of short patterns of both alloys are compared by the tensile test.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk | 8 |
| Seznam použitého označení | 9 |
| ÚVOD | 10 |
| 1. SOUČASNÝ STAV VÝVOJE TECHNOLOGIÍ ZJEMŇOVÁNÍ STRUKTURY U KOVOVÝCH MATERIÁLŮ | 11 |
| 1.1. HPT (High Pressure Torsion) – krut spojený s vysokým tlakem | 11 |
| 1.2. ECAP (Equal Channel Angular Pressing) – protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem | 12 |
| 1.3. MAC/F (Multi-Axial Compressions / Forgings) – Multi – Axiální komprese | 12 |
| 1.4. ARB (Accumulative Roll Bonding) – vícenásobné dělení a válcování | 13 |
| 1.5. RCS (Repetitive Corrugation and Straightening) – opakované vlnění a rovnání | 14 |
| 1.6. Con – shearing process (proces využívající smykové deformace) | 14 |
| 2. ECAP | 15 |
| 2.1. Princip procesu ECAP | 16 |
| 2.2. Základní technologické parametry | 17 |
| 3. METODY PRO VYHODNOCOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A TVÁŘITELNOSTI | 19 |
| 3.1. Metody vyhodnocování mechanických vlastností – klasické vzorky | 20 |
| 3.1.1. Zkouška tahem | 20 |
| 3.1.2. Pěchovací zkouška | 22 |
| 3.1.3. Zkoušky tvrdosti | 23 |
| 3.1.4. Zkouška rázem v ohybu | 24 |
| 3.2. Metody vyhodnocování mechanických vlastností krátkých vzorků | 26 |
| 4. VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN ALMn1Cu A ALFe1,5Mn TAHOVOU ZKOUŠKOU PRO KRÁTKÉ VZORKY | 27 |
| 4.1. Princip tahové zkoušky | 27 |
| 4.2. Zařízení | 28 |
| 4.3. Zkušební vzorky | 29 |
| 4.4. Slitina AlMn1Cu | 31 |
| 4.5. Slitina AlFe1,5Mn | 33 |
| 4.6. Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti | 34 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5. | VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN ALMn1Cu A ALFe1,5Mn PENETRAČNÍ ZKOUŠKOU | 36 |
| 5.1. | Princip penetrační zkoušky | 36 |
| 5.2. | Zařízení | 37 |
| 5.3. | Vzorky | 39 |
| 5.4. | Slitina AlMn1Cu..... | 40 |
| 5.5. | Slitina AlFe1,5Mn | 43 |
| 6. | CELKOVÉ VYHODNOCENÍ..... | 46 |
| | Seznam použité literatury..... | 49 |
| | Seznam příloh | 50 |

Seznam použitých zkratk

| | |
|-------|---|
| UFG | velmi jemnozrnná struktura (1000-100 nm) |
| SPD | vícenásobná plastická deformace |
| ECAP | proces protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem |
| HPT | proces zpevňování krutem za vysokého tlaku |
| ARB | proces vícenásobného dělení a válcování |
| MAC/F | proces Multi – Axiální komprese |
| RCS | proces opakovaného vlnění a rovnání |
| HB | zkouška tvrdosti podle Brinella |
| HV | zkouška tvrdosti podle Vickerse |
| HRB | zkouška tvrdosti podle Rockwella (vtiskací tělísko – kulička) |
| HRC | zkouška tvrdosti podle Rockwella (vtiskací tělísko – kužel) |

Seznam použitého označení

| Značka | Název veličiny | Jednotka |
|------------|--|----------|
| Φ | úhel přechodu dvou kanálů (vnitřní úhel) | [°] |
| Ψ | úhel zaoblení přechodu kanálu (vnější úhel) | [°] |
| R_1 | vnitřní radius nástroje ECAP | [mm] |
| R_2 | vnější radius nástroje ECAP | [mm] |
| F_p | síla charakterizující přechod z lineární části do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku | [N] |
| F_{\max} | maximální síla předcházející penetraci | [N] |
| $F_{p0,2}$ | zatížení na 0,2 % protažení vzorku | |
| $R_{p0,2}$ | smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením | [MPa] |
| R_m | mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| L_u | konečná délka zkušební tyče (tahová zkouška) | [mm] |
| L_0 | počáteční délka zkušební tyče (tahová zkouška) | [mm] |
| S_0 | počáteční průřez zkušební tyče (tahová zkouška) | [mm] |
| A | tažnost | [%] |
| d_{\max} | protažení vzorku při max. síle předcházející penetraci vzorku | [mm] |
| F_b | síla při penetraci (dolomení) | [N] |
| d_f | protažení vzorku při síle odpovídající penetraci (dolomení) | [mm] |

ÚVOD

Kovy s velikostí zrna menší než $1\text{ }\mu\text{m}$ získaly velkou pozornost v posledních deseti letech. Tyto materiály byly klasifikovány jako velmi jemnozrné materiály (UFG). Velikosti zrna se pohybuje do 100 nm . Tato práce se zabývá výrobou UFG materiálů pomocí vícenásobné plastické deformace, kde dochází ke zmenšení velikosti zrn a zjemnění struktury materiálu a tím i zlepšení mechanických vlastností při zachování nebo mírném poklesu tažnosti. Metody vícenásobné plastické deformace (SPD) jsou vyvíjeny od 90-tých let minulého století. Materiály zpracované procesem SPD vykazují nejen unikátní fyzikální a mechanické vlastnosti, ale taky řadu výhod oproti UFG materiálům vyráběných jinými metodami, např. pomocí práškové metalurgie [2, 3].

Nejlepších výsledků pomocí technologie SPD dosahuje proces protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem ECAP. Tento proces spočívá v zavádění velké plastické deformace v obrobku tím, že materiál je pomocí lisovníku protlačován pravoúhlým rovnostranným kanálem. Vzhledem k tomu, že oba kanály jsou stejné, lze materiál znovu vložit do vstupního kanálu a protlačit jej opakovaně. Tímto způsobem dosáhneme UFG struktury.

Je známo, že kovy s velmi jemným zrnem do velikosti $10\text{ }\mu\text{m}$ mají větší citlivost na prodloužení za zvýšené teploty a vykazující superplastické chování. Nicméně, toto superplastické chování se obvykle projeví při teplotě vyšší než $0,5T_{\text{tav}}$ a velmi nízké rychlosti deformace (menší než $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, v závislosti na materiálu). Laboratorní studie ukázaly, že to platí zejména pro UFG materiály vyrobené technologiemi SPD. Tato kombinace vlastností činí UFG materiály velmi vhodné pro obrábění, kování nebo protlačování, a to jak z hlediska tváritelnosti tak i úspory energie a nákladů. V posledních letech došlo k pokusu o převod těchto potenciálních přínosů pozorované v laboratorním měřítku do průmyslové výroby. Hlavní důvody byly, že studia v laboratorním měřítku byly prováděny na rozvoj vědeckého poznání procesů, které vedou k zjemnění zrna během SPD. Vzorky připraveny v laboratorním měřítku jsou rozměrově omezeny $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$. Základní problematikou bylo prokázání možnosti zavedení procesu ECAP do poloprovozní praxe (větší rozměry vzorku) [2].

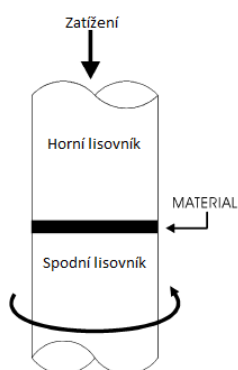
1. Současný stav vývoje technologií zjemňování struktury u kovových materiálů

Výzkumem technologií v oblasti zjemňování struktury kovových materiálů se zabývají vědci již od roku 1990. Materiály s velmi jemnozrnnou strukturou dělíme na velmi jemnozrnné materiály (UFG), které mají velikost zrna 100 nm – 1000 nm a nanomateriály, u kterých se velikost zrna pohybuje do 50 nm. UFG materiály mají především vysokou pevnost při nízkých tvářecích teplotách a zároveň při zachování velmi dobré tvářitelnosti. Tyto vlastnosti jsou velice atraktivní pro tváření, protože jsou zachovány i po dalším zpracování, až do finálních operací [6].

Nejslibnější technologií zjemňování struktury kovů a jejich slitin je technologie, která využívá vícenásobné plastické deformace (SPD). SPD procesy využívají vysoké plastické deformace ke zjemnění zrna. Mezi moderní SPD metody patří: HPT (krut spojený s vysokým tlakem), MAC/F (multi – axiální komprese), ARB (vícenásobné dělení a válcování), RCS (opakované vlnění a rovnání), Con – shearing process (proces využívající smykové deformace), ECAP (protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem) [2].

1.1. HPT (High Pressure Torsion) – krut spojený s vysokým tlakem

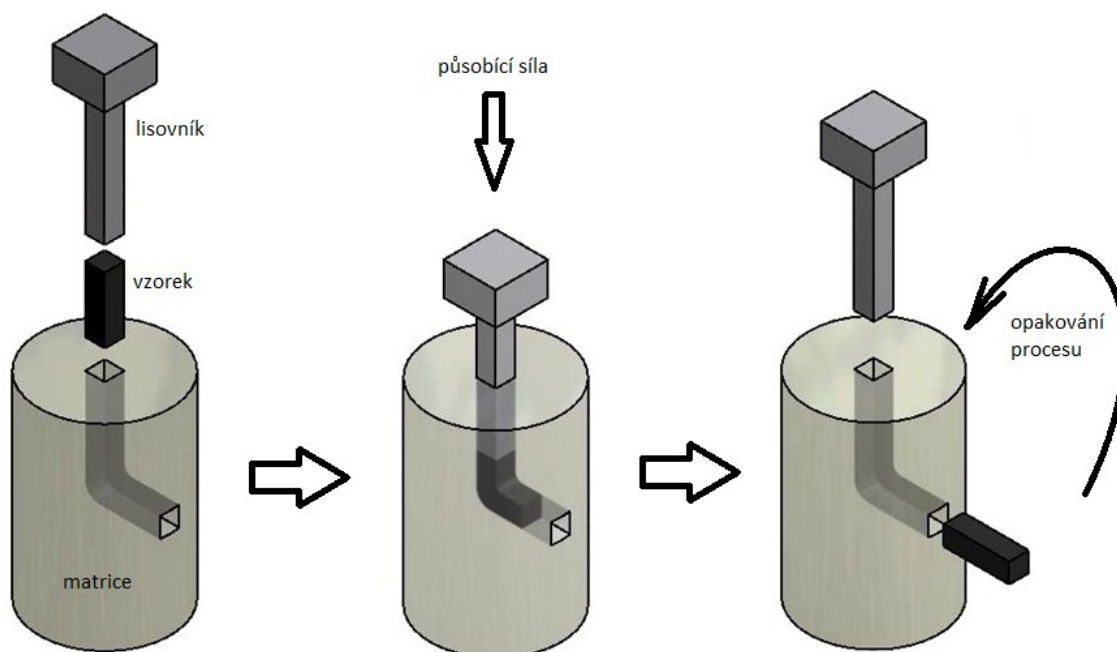
Vzorek má tvar malé podložky a je vložen mezi lisovníky s válečkovým vybráním. Spodní lisovník se otáčí a na horní lisovník působí zatížení, které vyvolává tření mezi lisovníkem a vzorkem. Třením se přenáší krut, který je potřebný k deformaci vzorku. Princip je znázorněn na obrázku 1.1. Použití této metody je omezeno na malé vzorky [2].



Obr. 1.1 Princip metody HPT [2]

1.2. ECAP (Equal Channel Angular Pressing) – protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem

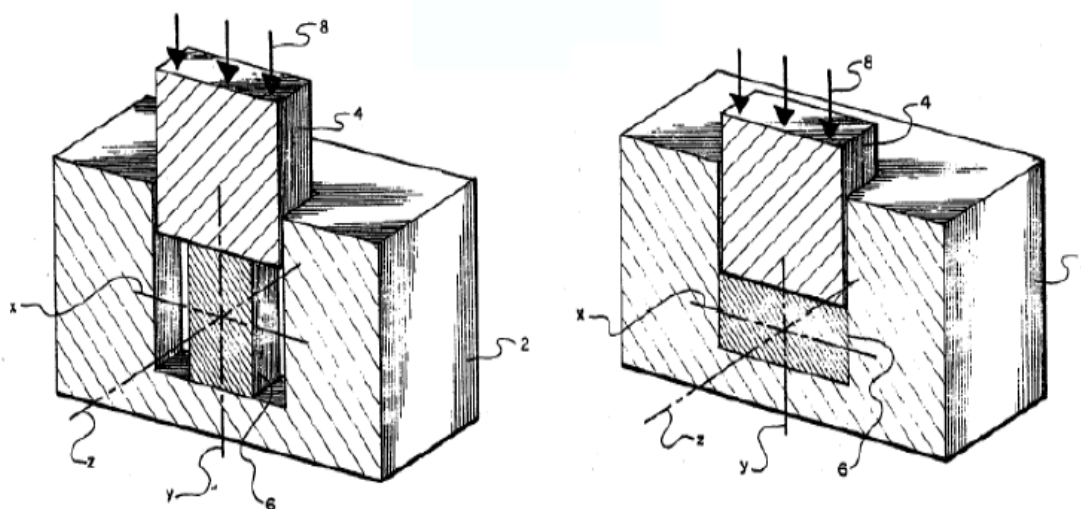
Proces ECAP je zatím nejschůdnější postup tváření k protlačení materiálu pomocí speciálně konstruovaného kanálu bez jakýchkoliv zásadních změn v geometrii u UFG materiálů [3]. Princip je založen na protlačování vzorku kanálem s konstantním tvarem. Podrobněji je tato metoda popsána v kapitole 3. Princip je znázorněn na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Princip procesu ECAP

1.3. MAC/F (Multi-Axial Compressions / Forgings) – Multi – Axiální komprese

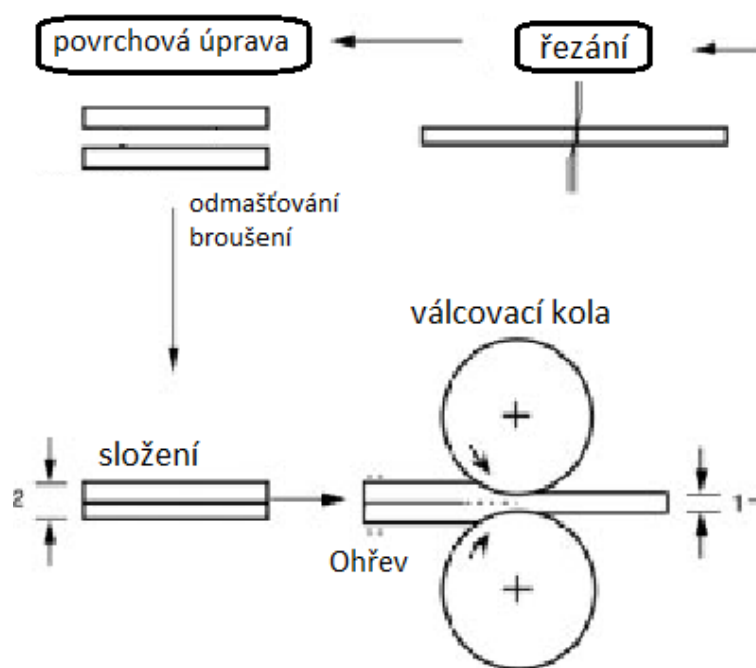
Multi – Axiální komprese výkovku zahrnuje deformaci obdélníkového průřezu vzorků opakovanou kompresí při zachování původních rozměrů vzorku. Mezi kompresemi se vzorek otáčí o 90 °. Schéma jednoho kroku vícenásobné komprese je znázorněno na obrázku 1.3. Metoda je účinná pro výrobu jemnozrnné struktury [2].



Obr. 1.3 Princip Multi - Axiální komprese [2]

1.4. ARB (Accumulative Roll Bonding) – vícenásobné dělení a válcování

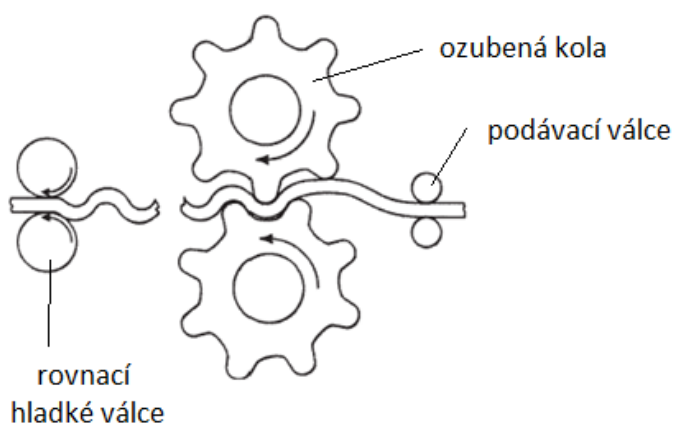
Principem metody ARB je rozříznutí válcovaného plechu na dvě stejné části. Po očištění se plechy položí na sebe a provede se ohřev. Pak se plechy válcují a dojde k vytvoření plechu původní tloušťky. Rozměry jsou před a po procesu stejné. Jedná se o o intenzivně zkoumanou metodu. Schéma procesu ARB je znázorněn na obrázku 1.4 [2].



Obr. 1.4 Princip metody ARB [2]

1.5. RCS (Repetitive Corrugation and Straightening) – opakované vlnění a rovnání

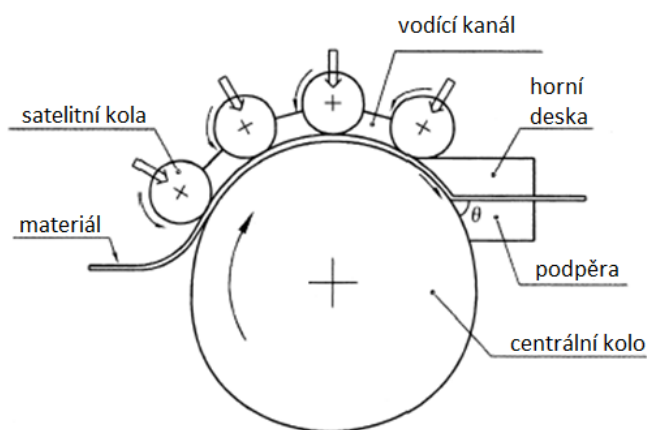
Metoda RCS je založena na opakovaném zvlnění a následném rovnání. Tento proces může být buď spojitý, nebo nespojitý. Materiál je podáván hladkými válci mezi ozubená kola, kde působí plastická deformace a následně válcován válci do původního tvaru [2]. Schématicky je proces znázorněn na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Princip metody RCS [2]

1.6. Con – shearing process (proces využívající smykové deformace)

Jedná se o proces, při kterém je pás plechu veden vodící drážkou mezi centrálním kolem a satelitními koly kde dochází k protlačování do zápustky deformaci (viz obr 1.6). Vzhledem k tomu, že má průběh stejné kanály, je tloušťka plechu nezměněna [2].



Obr. 1.6 Princip procesu Con – shearing [2]

2. ECAP

Nástroj ECAP byl vyvinut v 80 – tých letech v Rusku [2]. V posledních letech se znalosti a využití této metody podstatně prohloubily. Trend dnešní doby vyžaduje vyvíjení nových technologií pro vývoj nových materiálů s daleko vyššími mechanickými vlastnostmi, podstatou je dosažení UFG struktury. U procesu ECAP je zkoumán vliv geometrie kanálu, který má přinést zvýšení stupně plastické deformace v prvním a dalších průchodech nástrojem ECAP. Z hlediska vývoje technologie je významným poznatkem snížení počtu průchodů oproti klasickému řešení a tím docílení možnosti použití v praxi. Na obr. 2.1 je znázorněna klasická vložka nástroje ECAP s kanály, kterými je vzorek protlačován.

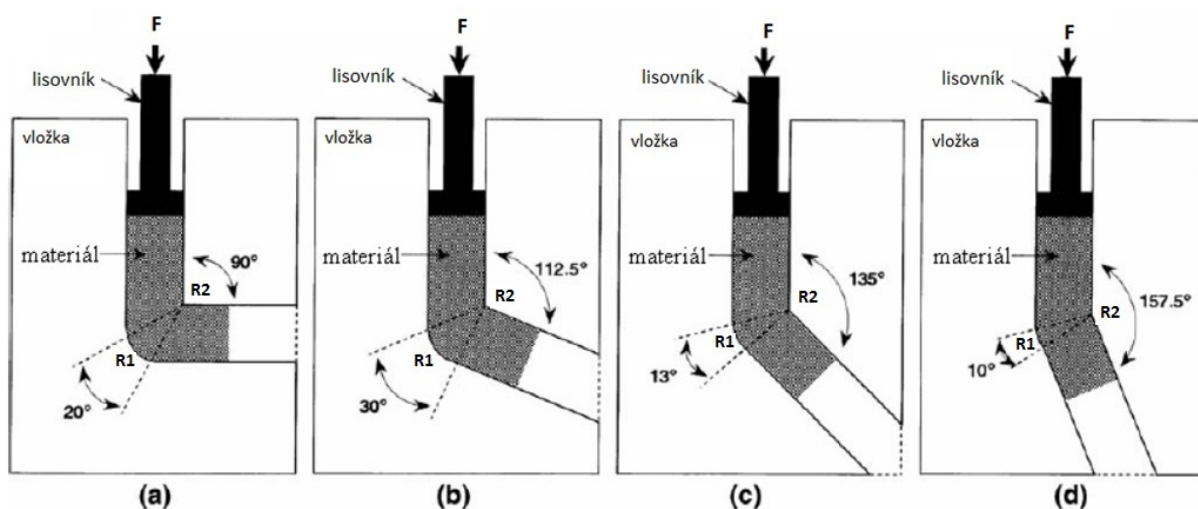


Obr. 2.1 Vložka [10]

2.1. Princip procesu ECAP

Metoda ECAP je založena na principu vyžití vícenásobné plastické deformace. Vzorek je protlačován kanálem válcového nebo čtvercového průřezu (viz obr. 2.2). Kanál je složen z vertikální a horizontální části se stejným průřezem. Oba kanály svírají mezi sebou úhel $\Phi = 90^\circ - 157,5^\circ$ (viz obr. 2.2). Úhel zaoblení přechodu protlačovacích kanálů (Ψ) se obvykle volí 60° . Na vzorek vložený do svislého kanálu působí silou lisovnick. V okamžiku, kdy se vzorek dostane do místa přechodu kanálů, dojde ke vzniku velké plastické deformace a vlivem střižných sil dochází k rozdrobování zrna [2]. Protlačování probíhá za pokojové teploty (20°C) nebo při zvýšené teplotě – v závislosti na typu materiálu.

Výhodou této metody je, že můžeme tento postup opakovat, protože vzorek před a po průchodu nemění svůj průřez. Velikost dosažené deformace závisí na úhlu, který svírají oba kanály (Φ), na úhlu zakřivení oblouku (Ψ), poloměrech R_1 a R_2 a na celkovém počtu průchodů vzorku maticí. Na výslednou strukturu a mechanické vlastností má v neposlední řadě vliv druh pootočení vzorku mezi jednotlivými průchody v různých směrech i jeho orientacích. V současné době jsou známy čtyři způsoby pootočení, které jsou popsány jako průchod typu „A“, typu „BA“, typu „Bc“ a typu „C“. Při průchodu typu „A“ je vzorek protlačován bez následného otočení. Při průchodu „B“ je vzorek otočen o 90° mezi každým protlačením, s otočením se změnou směru, které označujeme jako průchod typu „BA“ a s otočením ve stejném směru je to průchod typu „Bc“. Při průchodu typu „C“ je vzorek otočen o 180° mezi každým protlačením [2].



Obr. 2.2 Princip procesu ECAP s rozdílnými úhly přechodu kanálů [4].

Mezi primární nevýhody ECAP procesu patří omezenost na rozměrově malé vzorky z důvodu vzniku velkých třecích sil ve vstupním kanálu. Většími vzorky jsou kladeny obrovské nároky na dutiny kanálů v matici, kde dochází ke vzniku trhlin v místech největších koncentrací napětí [2].

2.2. Základní technologické parametry

Podrobným zkoumáním metody ECAP bylo objeveno několik faktorů, které mají vliv na výslednou mikrostrukturu materiálu. Mezi tyto faktory patří velikost úhlu Φ , úhel zakřivení vnějšího oblouku Ψ , velikost zaoblení hran přechodů kanálů R_1 a R_2 . Mezi faktory, které souvisí s režimy zpracování, a které můžeme ovlivňovat přímo během protlačování, patří rychlost protlačování, teplota nebo použití zpětného tlaku.

Úhel Φ (viz obr. 2.2) je důležitým faktorem při vlastních experimentech, neboť určuje velikost přetvoření získaného jedním průchodem a má přímý vliv na vlastnosti výsledné mikrostruktury. Z výsledků mnohaletého zkoumání vlivu úhlu Φ bylo zjištěno, že optimální hodnota úhlu je 90° , přičemž volba velikosti tohoto úhlu závisí také na typu materiálu.

Úhel Ψ (viz obr. 2.2) popisuje vnější oblouk v místě spojení horizontálního a vertikálního kanálu matrice. Ačkoli není jeho vliv na velikost přetvoření tak výrazný jak u úhlu Φ , je nutné úhel Ψ zkoušet z hlediska vlivu na vlastnosti získané struktury. Vliv rostoucího úhlu Ψ a snižujícího se úhlu Φ je největšího přetvoření dosaženo, je-li úhel $\Psi = 0^\circ$. Tato hodnota se v praxi obecně nepoužívá. V praxi se nejčastěji volí úhel 60° .

Zaoblení vnitřních hran R_1 a R_2 (viz obr. 2.2) závisí v dnešní době na experimentech a typu protlačovaného materiálu. Nejdůležitější zaoblení je označeno R_1 . Protlačovaný vzorek za působení síly lisovníku narazí v první fázi právě na zaoblení R_1 . Toto místo patří v celém nástroji k nejnamáhavějším. Různými experimenty bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dostaneme při zaoblení $R_1 = 4 \text{ mm}$ a $R_2 = 0,5 \text{ mm}$.

Rychlost protlačování do $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nemá relativně velký vliv na výslednou strukturu materiálu [14]. Experimenty bylo dokázáno, že nižší protlačovací rychlost vede k více rovnoměrné struktuře. Pro čistý hliník bylo použitím nástroje ECAP při pokojové teplotě a protlačovací rychlosti $18 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ dosaženo nárůstu teploty o $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ při průchodu střížnou rovinou a po 10 s se teplota vrátila na původní hodnotu. Zaznamenané zvýšení teploty nemá podstatný vliv na velikost zrna [7].

Teplota při protlačování má velký význam především u tvrdých materiálů. První výzkumy vlivu teploty na vlastnosti získané mikrostruktury čistého hliníku byly prováděny od pokojové teploty do 573 K . Analýza vykazuje podobná seskupení zrn, oddělených velkým úhlem na hranici zrn za pokojové teploty, ale při zvyšování teploty dochází k rovnoměrnému růstu zrn. Zachováním nízkých teplot při protlačování má za následek dosažení rovnoměrné struktury s nejmenší možnou velikostí zrna a největším podílem velkoúhlových hranic mezi zrny [7].

3. Metody pro vyhodnocování mechanických vlastností a tvářitelnosti

Již Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan jednoduchou tahovou zkouškou. První zkušební tahový stroj byl sestaven roku 1729 a systematicky začalo zkoušení pevnosti od poloviny 19. století. Počátkem 20. století byly objeveny zkoušky tvrdosti a krátce na to zkoušky vrubové houževnatosti. U některých materiálů se rovněž provádí zkoušky tlakem, ohybem, stříhem či krutem [5].

Vyhodnocování mechanických vlastností materiálů patří k velmi důležitým oblastem nejen ve strojírenství. Vyhodnocování provádíme pomocí zkoušek, kterých existuje celá řada. Některé se používají pro testování jak křehkých tak houževnatých materiálů (zkoušky tvrdosti, tahová zkouška) a ostatní se používají jen ve speciálních případech. Tyto tzv. technologické zkoušky se využívají pro posouzení vhodnosti materiálu k určitému speciálnímu způsobu zpracování (slévatelnost, tvářitelnost).

Materiály jsou při používání a zpracování vystaveny různému namáhání (tah, tlak, krut, stříh a ohyb). Tato namáhání obvykle nepůsobí samostatně, ale v různých kombinacích, které nazýváme složené namáhání (materiál je namáhán současně tahem, ohybem i krutem). Aby mohl materiál odolávat těmto namáháním, musí mít určité vlastnosti, jako pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost aj.). Na mechanické vlastnosti materiálů má značný vliv také teplota. Při určitých teplotách dochází ke změně krystalických struktur materiálů, a tím se změní i jejich mechanické vlastnosti. Vznikem vnitřního pnutí u tváření za studena dochází k deformaci krystalické mřížky. Tím dochází ke zvýšení pevnosti a zároveň ke snížení tažnosti [5].

Mechanické zkoušky většinou neprovádíme na dané součásti, ale na zkušebních vzorcích (mají většinou tvar tyčí) odebraných přímo ze součásti, nebo na vzorcích vyrobených z totožného materiálu. Podrobné údaje o mechanických zkouškách materiálů obsahuje norma ČSN 42 0300 – sada [5].

3.1. Metody vyhodnocování mechanických vlastností – klasické vzorky

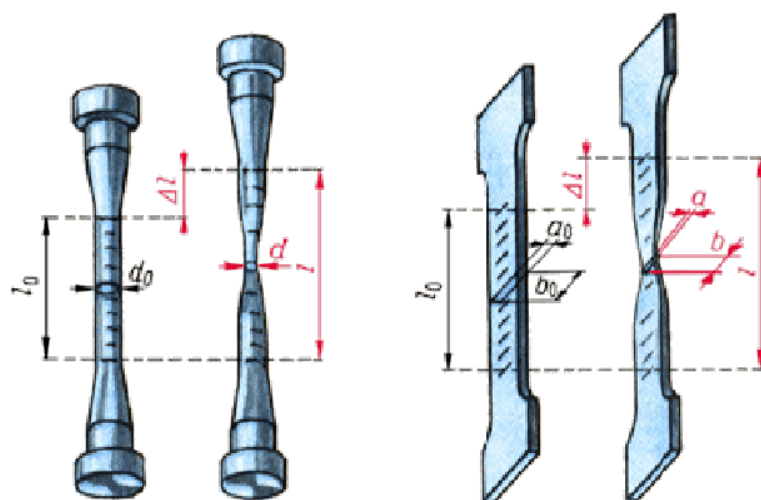
Zkušebním vzorkem je vzorek o rozměrech a geometrickém tvaru, které stanoví norma dané zkoušky, podle které musí být vzorek připraven.

Zkoušky mechanických vlastností kovů rozdělujeme podle charakteru zatěžování na statické, dynamické, cyklické a zvláštní technické [1]. Statické zkoušky jsou charakterizovány pozvolným zvyšováním zatížení. Patří mezi ně zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a střihu. V praxi se setkáváme nejčastěji s namáháním, jehož velikost nebo smysl se prudce nebo opakovaně mění. Ke zjištění potřebných údajů o chování takto namáhaného materiálu nelze použít statické zkoušky, ale zkoušky dynamické, mezi které patří nejpoužívanější zkouška rázem v ohybu. U dynamických zkoušek působí síla nárazově po dobu zlomku sekundy. Do kategorie zvláštních technických zkoušek mechanických vlastností patří zkoušky tvrdosti. Zkoušky mechanických vlastností materiálů můžeme rozdělit do tří skupin dle teploty, při které zkoušky provádíme na zkoušky za normálních, nízkých a vysokých teplot [5].

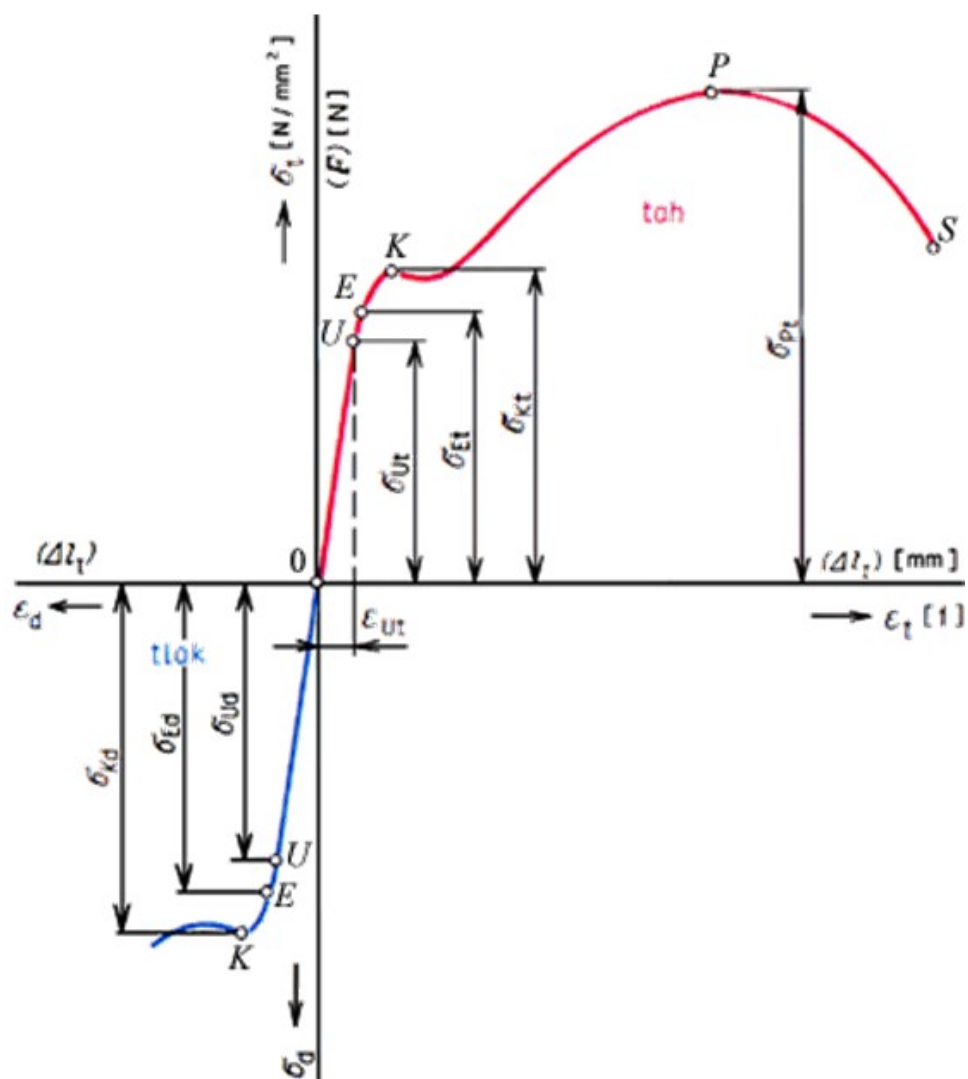
3.1.1. Zkouška tahem

Je nejrozšířenější statickou zkouškou. Je podrobně popsána normou ČSN 42 0310. Je nutná téměř u všech technických materiálů, protože jí získáme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. K provedení zkoušky je zapotřebí zkušební tyč (válcového nebo obdélníkového průřezu) a zkušební stroj, který může být jednoúčelový (pouze pro tahovou zkoušku) nebo univerzální (lze provádět více druhů zkoušek) [1].

Zkoušky tahem se většinou neprovádí na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích stejného materiálu, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány (viz obr. 3.1). Původně trhací stroje zaznamenávaly průběh závislosti síly na dráze na papír navinutý na buben registračního přístroje. Zakreslený průběh se nazývá pracovní diagram (viz obr. 3.2) a udává závislost poměrného prodloužení ε na napětí σ (nebo změny délky Δl na zatěžující síle F) [5].



Obr. 3.1 Rozměry zkušebních tyčí [5]



Obr. 3.2 Pracovní diagram zkoušky tahem [5]

Z diagramu vidíme, že zpočátku je prodloužení tyče přímo úměrné vzrůstajícímu zatížení, a to až do bodu U . Napětí σ_U , odpovídající bodu U , nazýváme mez úměrnosti a definujeme ji jako mezní napětí, při němž je prodloužení přímo úměrné napětí (Hookův zákon). Až do bodu E je protažení pružné, a to znamená, že po odlehčení se tyč vrátí do původního stavu. Napětí σ_E odpovídající bodu E je mez pružnosti a definujeme ji jako mezní napětí, které po úplném odlehčení nevyvolá trvalé deformace. Při dalším zatěžování nastává trvalá plastická deformace (tyč se již nevrátí do původní délky). Napětí σ_K odpovídající bodu K označujeme jako mez kluzu v tahu a definujeme je jako nejmenší napětí, při němž nastává podstatná deformace, která někdy dočasně pokračuje, aniž se zároveň zvyšuje napětí. Proto jako běžnou smluvní hodnotu bereme napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0.2 %, tj. $\sigma_{0.2}$. Zjišťujeme je buď graficky, nebo měřicím zařízením (průtahoměry). Napětí σ_{Pt} v bodě P udává největší hodnotu zatížení v době, kdy zkoušený vzorek není přetržen. V bodě S dojde k přetržení zkoušeného materiálu [5].

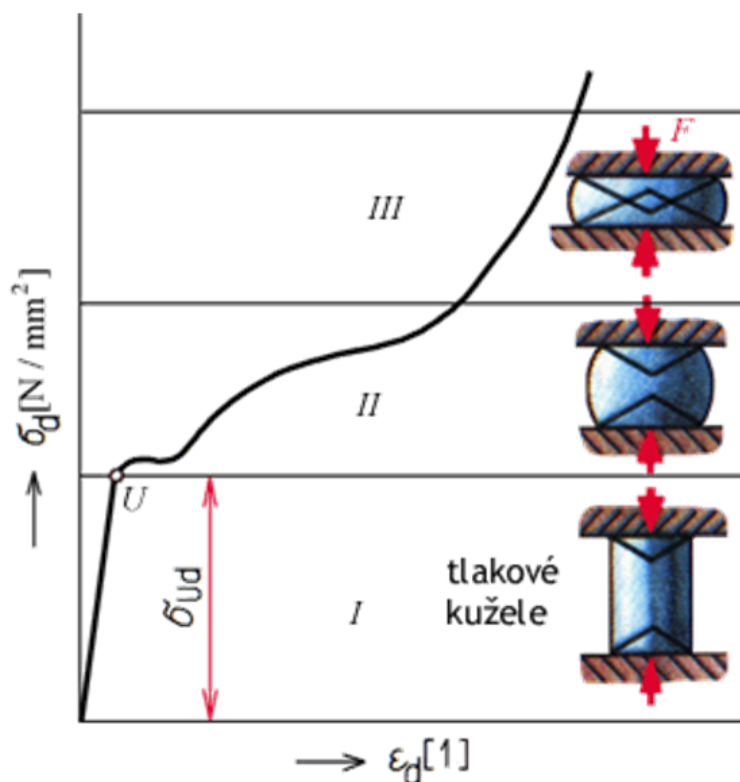
V současné době (na zařízeních INSTRON, Zwick) jsou všechny potřebné hodnoty digitálně snímány a vyhodnocovány, čímž je dosaženo podstatně vyšší přesnosti výsledků.

3.1.2. Pěchovací zkouška

Použití této zkoušky je v praxi méně časté. Pro ocel není nutná, protože hodnoty meze úměrnosti a meze kluzu v tahu i tlaku jsou přibližně stejné. Zkoušky provádíme u ložiskových kovů, litiny, vrstvených tvrzených hmot, keramických látek, stavebních hmot. Zkušební vzorky mají obvykle tvar válečku ($\phi d = 10$ až 30 mm). Výška válečku h je při hrubých zkouškách rovna průměru d , při přesných měřeních volíme výšku $h = (2,5 \text{ až } 3) d$. Zkušební vzorky z kamene, betonu, dřeva apod. mají tvar krychle [5].

Průběh tlakové deformace zkoušeného válečku z houževnatého materiálu (měkké oceli) je znázorněno na obr. 3.3. V první fázi zkoušky je křivka napětí strmá, materiál odolává tlaku a tvoří se tzv. tlakové kužele. V druhé fázi hmota tělesa lehce klouže po kuželových plochách do stran, což se jeví v tlakovém diagramu menším vzrůstem napětí vzhledem k deformaci. V třetí fázi se tlakové kužele k sobě přiblíží a dojde k růstu odporu proti stlačování a křivka stlačení má opět strmý průběh. Této fáze obvykle u tlakových

zkoušek nedosahujeme. U křehkého materiálu nastává rozdrčení vzorku (lom) bez plastické deformace. Stejně jako u trhací zkoušky lze u tlakové zkoušky z pracovního diagramu určit pevnost v tlaku σ_{pd} , prosté zkrácení (stlačení) Δl_d , poměrné zkrácení (stlačení) ε_d , poměrné zkrácení (stlačení) v procentech δ_d , příčné rozšíření ψ_d . Rozměry i definice těchto hodnot jsou stejné jako pro zkoušku tahem. Mez pevnosti v tlaku se uvádí jen pro křehké materiály, protože u měkkých a tvárných kovů nelze určit okamžik porušení.

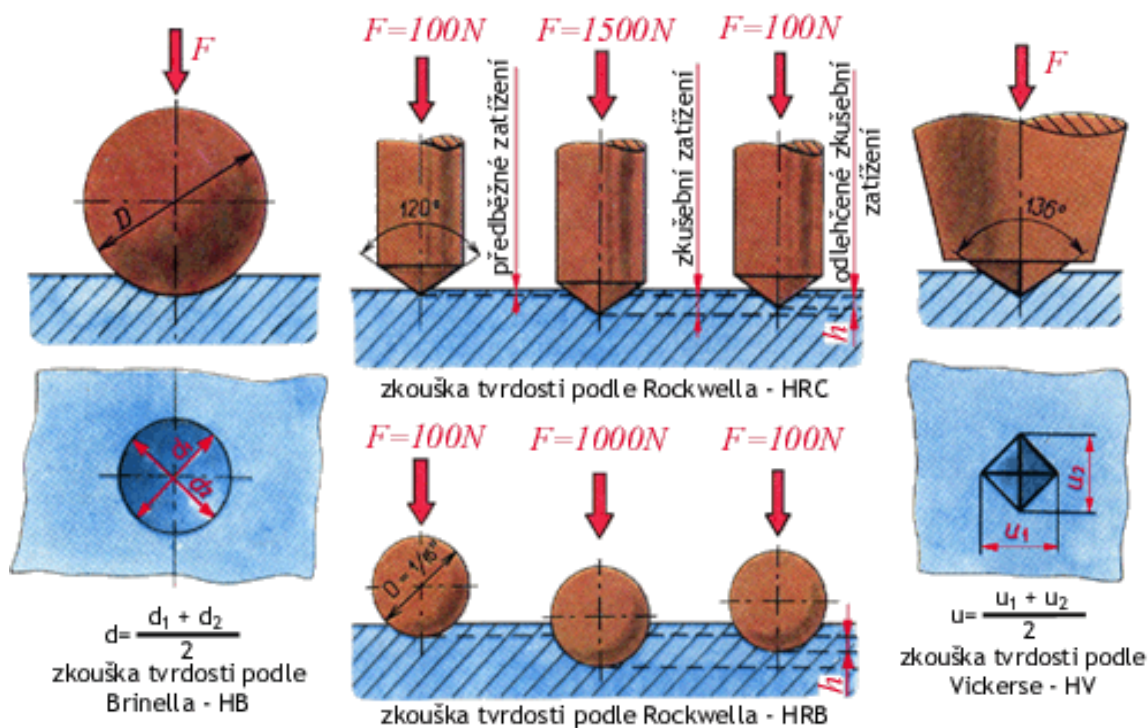


Obr. 3.3 Pracovní diagram tlakové zkoušky měkké uhlíkové oceli [5].

3.1.3. Zkoušky tvrdosti

Tvrdot lze popsat jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa a zjišťuje se vtiskovými, vrypovými nebo odrazovými zkouškami tvrdosti. V praxi jsou nejpoužívanější vtiskové zkoušky, protože jimi můžeme tvrdost zjistit nejrychleji, nejlevněji a i na malých předmětech. Zkoušky se provádí buď na zkušebních vzorcích, nebo přímo na hotových výrobcích.

Hodnoty tvrdosti se uvádějí bez jednotek. Pro tvrdost používáme značku H, které přiřčením další písmena (HB, HRB, HV), podle druhu prováděné zkoušky. U vtiskových zkoušek zatlačujeme do zkušebního materiálu velmi tvrdé těleso (kuličku, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (jeho plocha, hloubka nebo úhlopříčka, obr. 3.4). Nejznámější jsou zkoušky tvrdosti podle Brinella (ČSN 42 0371), Rockwella (ČSN 42 0373) a Vickerse (ČSN 42 0374). Tvrdost neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al a jejich slitiny) zkoušíme nejčastěji podle Brinella, tvrdé a kalené materiály podle Rockwella. Zkouška tvrdosti podle Vickerse odstraňuje nevýhody obou předcházejících zkoušek a je nejpoužívanější [5].



Obr. 3.4 Zkoušky tvrdosti [5]

3.1.4. Zkouška rázem v ohybu

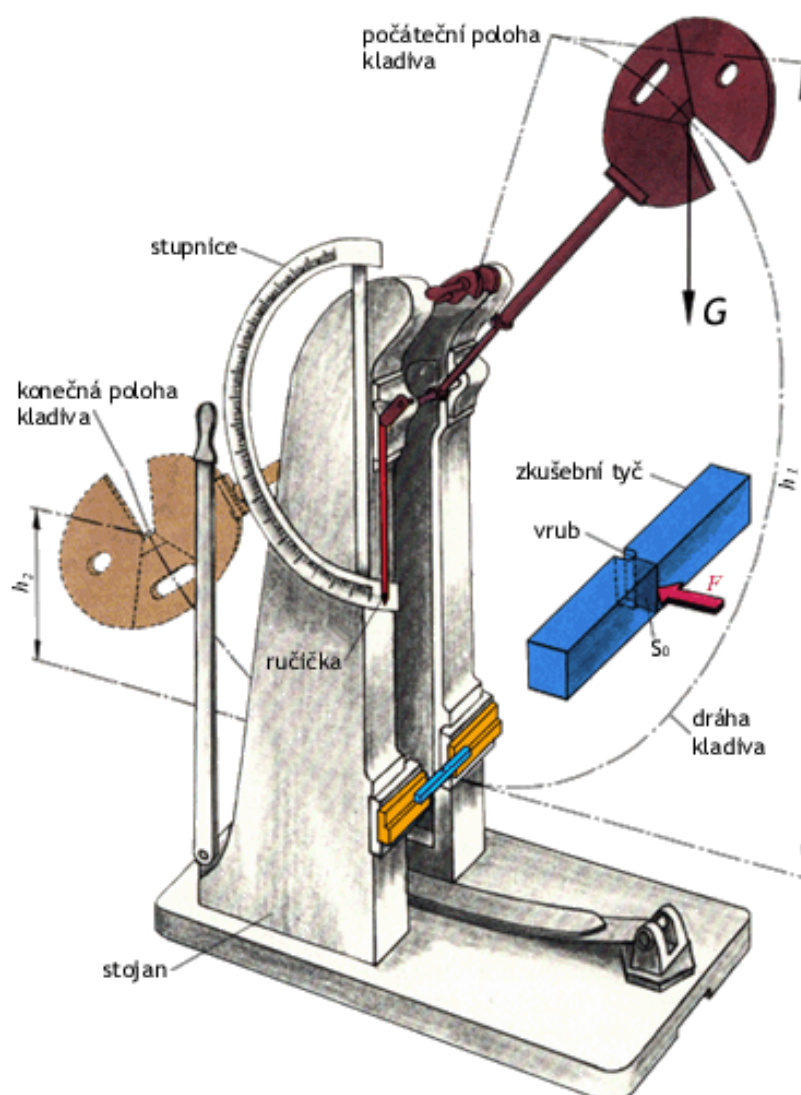
Tato dynamická zkouška je ze všech zkoušek nejpoužívanější a je velmi dobrým ukazatelem houževnatosti nebo křehkosti materiálů. Nejběžnější je zkouška vrubové houževnatosti (ČSN 42 0381) na Charpyho kyvadlovém kladivu (obr. 3.5). Kladivo, které je otočné kolem osy, se zvedne a zajistí v horní poloze. V nejnižším místě dráhy kladiva se umístí ve stojanu kyvadlového kladiva zkušební tyč ze zkoušeného materiálu. Po uvolnění z horní polohy se kladivo pohybuje po kruhové dráze pomocí gravitační síly, do doby, než

narazí na zkušební tyč, kterou pomocí energie přerazí. Kladivo po přeražení dosáhne výšky menší než, byla výška odjištění kladiva, protože na přeražení zkušební tyče se spotřebovala určitá práce. Této práci říkáme spotřebovaná nárazová práce A_R a určuje se ze vztahu 1 [5].

$$A_R = G (h_1 - h_2) \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Podíl spotřebované nárazové práce A_R a původního nejmenšího průřezu v místě vrubu S_0 nazýváme vrubová houževnatost R a vypočteme ji ze vztahu 2 [5].

$$R = \frac{A_R}{S_0} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right] \quad (2)$$



Obr. 3.5 Zkouška vrubové houževnatosti [5]

3.2. Metody vyhodnocování mechanických vlastností krátkých vzorků

Pojmem krátký vzorek rozumíme materiál, který má nenormalizované a zmenšené rozměry oproti klasickým vzorkům daných normou. Hlavním cílem zmenšení rozměrů vzorků bylo zjednodušení a zlevnění zkušebních operací, ke kterému došlo úspěšně v 80. letech. Nevýhodou bylo určité riziko ztráty přesnosti a reprodukovatelnosti výsledků [9]. Důkladným studiem zkoušek UGF materiálů materiálu bylo zjištěno, že v současné době se pro hodnocení mechanických vlastností malých vzorků nejčastěji používá měření tvrdosti pomocí Vickerse pod nízkým zatížením (1,96 N až 9,81 N) a modifikovaných tahových zkoušek. Měření tvrdosti dle Vickerse se vzhledem k jeho specifikaci je bezproblémové [8].

Nejdůležitější zkouškou pro krátké vzorky je tahová zkouška. Princip je totožný jak u klasických vzorků. Odlišnost je v rozměrech vzorků a rozdílných upínacích čelistech na trhacím stroji. Vzhledem k nenormalizovaným podmínkám zkoušení se výsledek tahových zkoušek krátkých a klasický vzorků mírně liší. Komerční sféra vyžaduje provádění zkoušek dle schválených normovaných postupů, což u tahové zkoušky pro krátké vzorky zatím není splněno. Tahové zkoušce pro krátké vzorky se podrobně věnuje kapitola 4.

Souvisle byly vyvíjeny různé metody a testy, které nahrazovaly standardní zkoušky materiálů. Jedním z úspěšných objevů je použití tzv. penetračních testů malých tělísek ve tvaru disku. Tyto testy zaručují vysokou úroveň přesnosti, na kterou má velký vliv výpočetní technika zobrazující výstupní hodnoty v digitální podobě a přesnost trhacích strojů. Jejich princip je podrobně popsán v kapitole 5.

4. Vyhodnocení mechanických vlastností slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn tahovou zkouškou pro krátké vzorky

4.1. Princip tahové zkoušky

V prvním kroku jsem si vizuálně překontroloval vzorky, abych se ujistil, že nejsou patrné známky porušení povrchu včetně trhlin. Pomocí digitálního posuvného měřítka (přesnost 0,01 mm) a označovací jehly jsem vyznačil jemné rýsky ve vzdálenosti počáteční délky l_0 (10 mm). Na třech místech, kolmých k ose vzorku jsem stejným měřidlem změřil počáteční šířku b_0 a tloušťku a_0 a použil jsem průměrné hodnoty. Tyto dvě hodnoty jsem následně zadal do počítačového programu. Vzorek jsem upnul do mechanických čelistí trhacího stroje, které měly vrubované vložky, aby nedocházelo ke kluzu mezi vzorkem a čelistmi a tím i ke zkreslení výsledků. Do programu jsem vložil hodnoty rychlosti posuvu příčnicku a velikost vstupního zatížení a tím bylo zařízení připraveno pro provedení zkoušky (viz obr. 4.1). Po startu se zkušební vzorek zatížil tahovým namáháním až do přetržení. Z grafického záznamu deformační křivky počítačový program určil základní mechanické vlastnosti.



Obr. 4.1 Detail upnutí zkušebního vzorku

4.2. Zařízení

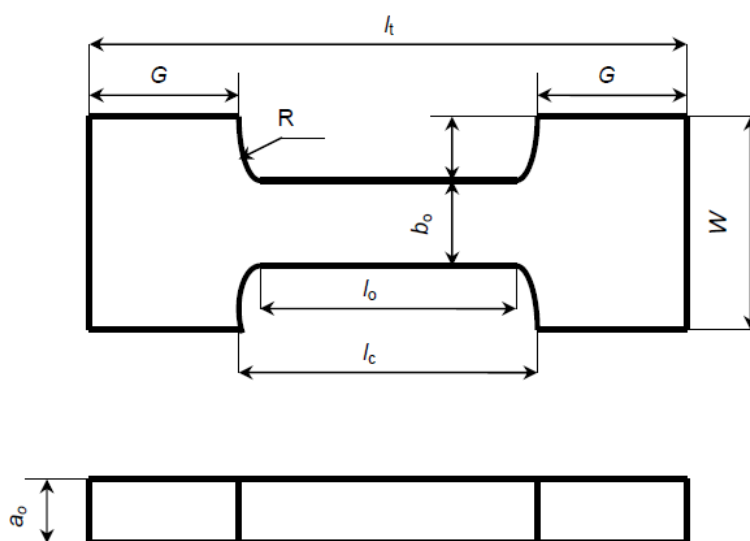
K provedení zkoušek jsem použil vhodně upravené zkušební zařízení pro zkoušky tahem s mechanickými upínacími čelistmi. Zařízení bylo opatřeno siloměrným snímačem, který splňoval podmínku, aby předpokládaná maximální síla při zkoušce dosahovala alespoň 15 % z jeho měřitelné – maximální kapacity. Zkoušky jsem prováděl na stroji typu Tira Test 2300 vybaveného počítačem s výkonným softwarem (viz obr. 4.2)



Obr. 4.2 Snímek zkušebního zařízení

4.3. Zkušební vzorky

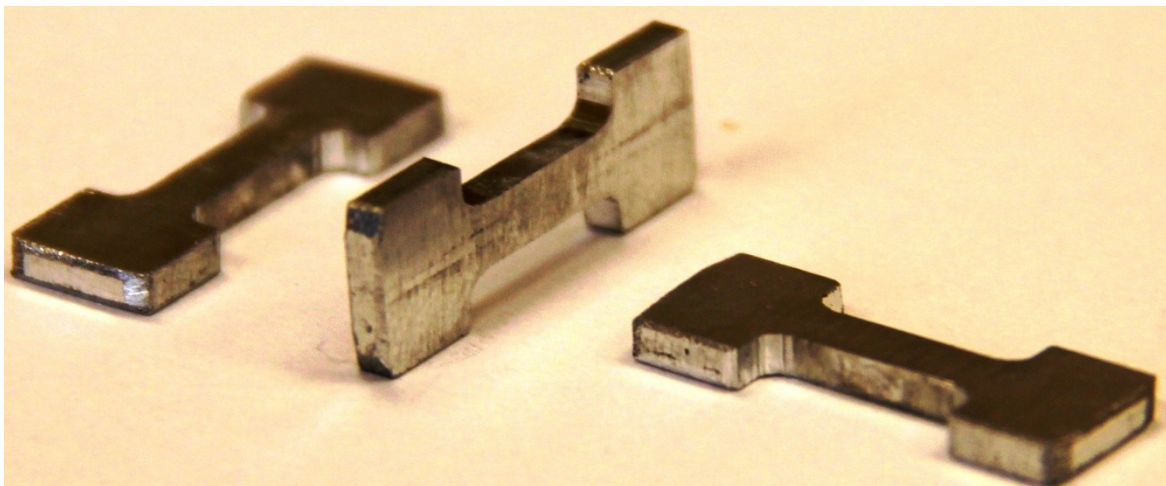
K tahové zkoušce krátkých vzorků jsem použil tyče obdélníkového průřezu vyrobené ze slitin AlFe1,5Mn a AlMn1Cu (viz obr. 4.3 a tab. 1). Zkušební tyče byly vyrobeny běžným strojním obráběním se zajištěním dostatečného chlazení, aby se zabránilo tepelnému ovlivnění. Doporučuje se využití metody elektrojiskrového dělení. Maximální drsnost kterékoliv plochy vzorku nesmí přesáhnout je $R_a = 1,2 \text{ mm}$. Na obr. 4.4 jsem znázornil zkušební vzorky před zkouškou a také po zkoušce na obr. 4.5.



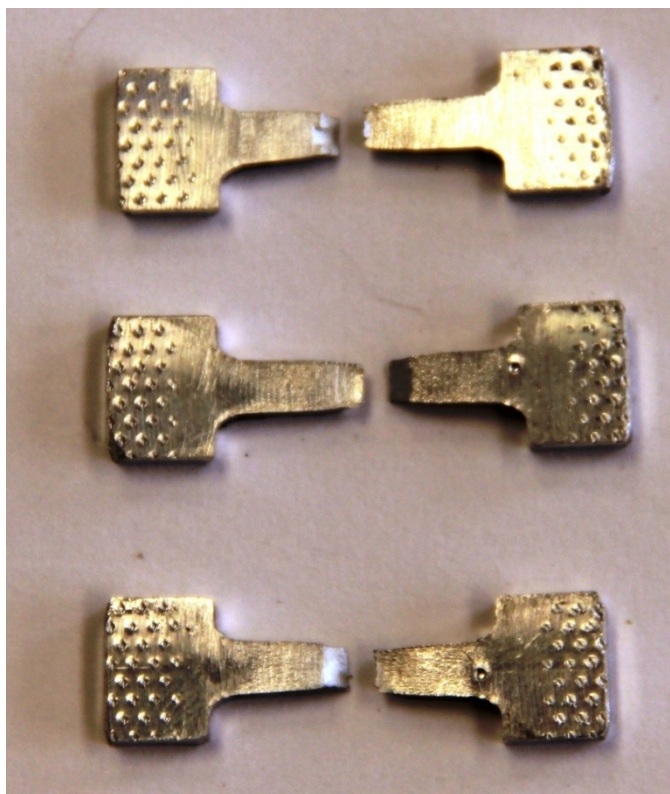
Obr. 4.3 Zkušební vzorek

Tab. 1 Rozměry vzorku

| Značka | Rozměr v mm |
|--------|--------------|
| a_0 | $2 \pm 0,1$ |
| b_0 | $3 \pm 0,1$ |
| l_0 | $10 \pm 1,0$ |
| l_c | $14 \pm 1,0$ |
| R | $5 \pm 1,0$ |
| G | $6 \pm 2,0$ |
| W | $8 \pm 2,0$ |



Obr. 4.4 Vzorky před zkouškou



Obr. 4.5 Vzorky po zkoušce

4.4. Slitina AlMn1Cu

Slitina je také označována názvem AW – 3003. Pevnost je vyšší než u čistého hliníku při současném zachování vysoké tvárnosti. Má velmi dobrou chemickou a korozní odolnost. Výhodou je také velmi dobrá svařitelnost. Tepelná a elektrická vodivost je nižší než u čistého hliníku. Nevýhodou je obtížná obrobiteľnosť. Používá se na málo namáhané součásti, vyrobené hlubokým tažením, ohýbáním, svařením (např. přístroje, nádrže, potrubí, chladiče pro automobily a traktory, nádoby na kapalinu). Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 2.

V tab. 3 jsou zaznamenány výsledky základních mechanických vlastností pro výchozí stav (bez protlačení) slitiny a také pro určitý počet protlačení nástrojem ECAP.

Tab. 2 Chemické složení slitiny AlMn1Cu

| chem. prvek | Si | Fe | Cu | Mn | ostatní | Al |
|-------------|------|------|------|-----|---------|--------|
| obsah [%] | 0,55 | 0,45 | 0,15 | 1,1 | 0,05 | zbytek |

Tab. 3 Výsledky tahové zkoušky krátkých vzorků slitiny AlMn1Cu

| Materiál | Vyosení kanálu | Počet průchodů | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A [%] |
|----------|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|-------|
| AlMn1Cu | výchozí stav | 0 | 80 | 140 | 30 |
| | 0° | 1 | 157 | 167 | 12 |
| | | 4 | 188 | 191 | 9,3 |
| | | 5 | 191 | 195 | 8,7 |
| | 10° | 1 | 165 | 172 | 11,5 |
| | | 4 | 183 | 195 | 9,2 |
| | | 5 | 193 | 198 | 8,5 |
| | 20° | 1 | 163 | 173 | 11,5 |
| | | 4 | 192 | 199 | 9,5 |
| | | 5 | 199 | 203 | 8,4 |

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ určená z trvalé deformace pod zatížením vyjadřuje napětí, při kterém trvalá deformace dosáhne dané hodnoty (0,2 % počáteční měřené délky zkušební tyče). Z pracovního diagramu tahové zkoušky se pomocí rovnoběžné přímkou s počáteční přímkou určí zatížení na 0,2 % protažení vzorku $F_{p0,2}$, a s hodnotou počátečního průřezu vzorku S_0 se dosadí do vztahu 3 [5].

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Mez pevnosti v tahu R_m je podle ČSN 42 0310 definována jako napětí, odpovídající největšímu zatížení, předcházejícímu přetržení zkušební tyče (maximální síla F_{\max} vztažená na původní průřez S_0), viz vztah 4 [5].

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Tažnost (poměrné prodloužení) A určuje procentní podíl počáteční (L_0) a konečné (L_u) měřené délky zkušební tyče určeného ze vztahu 5. Bylo zjištěno, že prodloužení je úměrné počátečnímu průřezu zkušební tyče. Tažnost se pak označuje indexem podle délky zkušební tyče (A_5 krátká tyč, A_{10} dlouhá tyč).

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

VYHODNOCENÍ

Výše uvedené mechanické vlastnosti se dají pracně a nepřesně určit, proto je dnes v praxi nutné využít digitální měřidla a záznamového zařízení připojené k počítači. V mém případě se jednalo o zkušební stroj Tira Test 2300, který byl napojen na počítač s výkonným softwarem. Výstupní hodnoty mechanických vlastností byly programem převedeny do digitální podoby bez manuálních výpočtů a odvozování z grafů.

Z naměřených hodnot mechanických vlastností (viz tab. 3) je patrné, že smluvní mez kluzu použitím nástroje ECAP vzroste v průměru o 100%, již po prvním průchodu. U meze pevnosti v tahu je nárůst okolo 22%. Zajímavým výsledkem byl téměř 60% pokles tažnosti mezi výchozím stavem a prvním průchodem. Nejlepších výsledků mechanických vlastností tedy lze dosáhnout použitím 20 ° vyosení kanálu ECAP a po 5. protlačeních.

Co se týče kontrakcí (zúžení), tak ty nebyly stanoveny záměrně. Měření je totiž v případě standardních zkušebních těles zatíženo chybou měření cca 2 %. V případě malých zkušebních těles může být tato chyba až 5 %. Protože jsme pracovali s extrémně deformovanými materiály, je sledována jen velmi malá kontrakce, takže s ohledem na předpokládanou chybu měření by uvádění těchto hodnot bylo dost technicky nepřesné.

4.5. Slitina AlFe1,5Mn

Slitina je také označována názvem AW – 8006. Je pevnější než čistý hliník při zachování vysoké tvárnosti. Používá se na středně a silně namáhané součásti. Výhodou je dobrá obrobiteľnosť a nevýhodou horší chemická odolnosť. Používá se v potravinářském průmyslu a je vhodná pro součástky a konstrukční prvky letadel, kolejových vozidel, automobilů a jiných dopravních prostředků. Chemické složení slitiny je uvedeno v tab. 4.

V tab. 5 jsou zaznamenány výsledky základních mechanických vlastností pro výchozí stav (bez protlačení) slitiny a také pro určitý počet protlačení nástrojem ECAP.

Tab. 4 Chemické složení slitiny AlFe1,5Mn

| chem. prvek | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | ostatní | Al |
|-------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|---------|--------|
| obsah [%] | 0,4 | 1,5 | 0,3 | 0,3-1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | zbytek |

Tab. 5 Výsledky tahové zkoušky krátkých vzorků slitiny AlFe1,5Mn

| Materiál | Vyosení kanálu | Počet průchodů | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A [%] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|-------|
| AlFe1,5Mn | výchozí stav | 0 | 70 | 115 | 35,5 |
| | 0° | 1 | 128 | 142 | 27,5 |
| | | 4 | 143 | 157 | 12 |
| | | 5 | 158 | 162 | 10 |
| | 20° | 1 | 137 | 146 | 26 |
| | | 4 | 154 | 165 | 10,2 |
| | | 5 | 162 | 167 | 7,5 |

VYHODNOCENÍ

Z naměřených hodnot mechanických vlastností (viz tab. 5) lze říci, že smluvní mez kluzu použitím nástroje ECAP vzroste v průměru o 90%, již po prvním průchodu. Mez pevnosti v tahu se zvýšila o 24%. Pokles tažnosti nebyl tak razantní jak u předchozí slitiny, protože klesla pouze o 28%. Nejlepších výsledků mechanických vlastností lze dosáhnout stejně jak u předchozí slitiny použitím 20 ° vyosení kanálu ECAP a po 5. protlačeních.

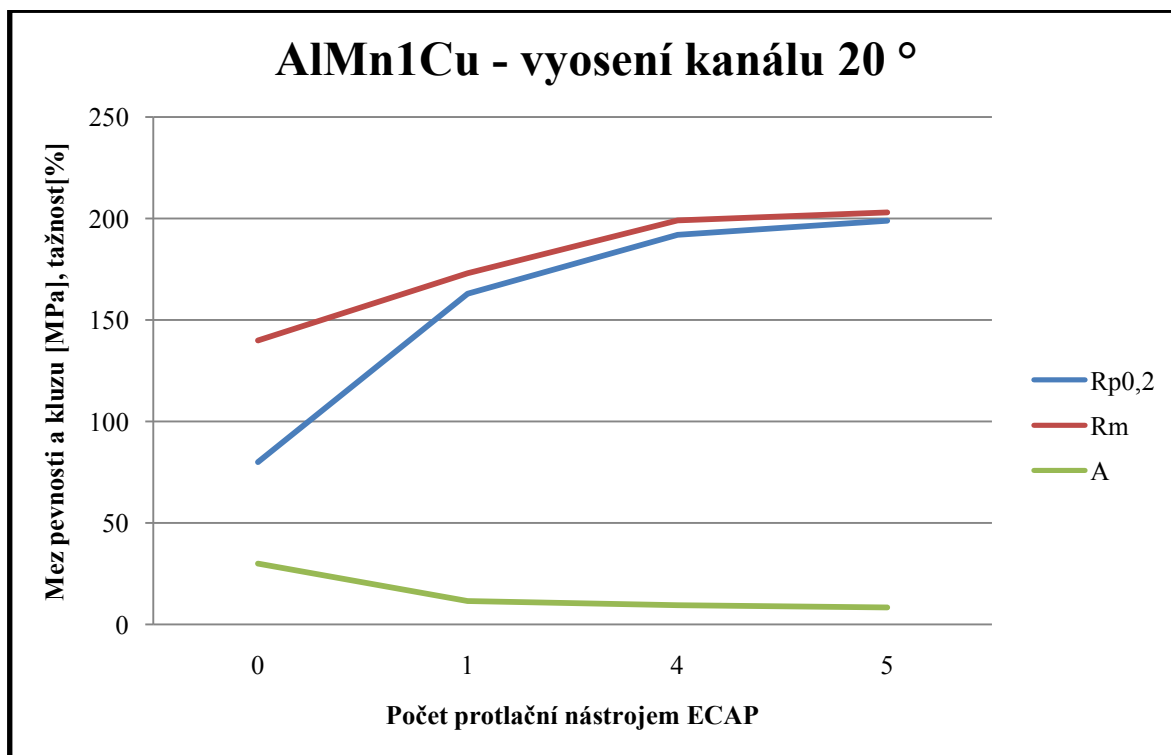
4.6. Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti

V této části práce jsem se zaměřil na porovnání dosažených výsledků mechanických vlastností tahové zkoušky pro slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn z hlediska vlivu počtu průchodů na mechanické vlastnosti slitin.

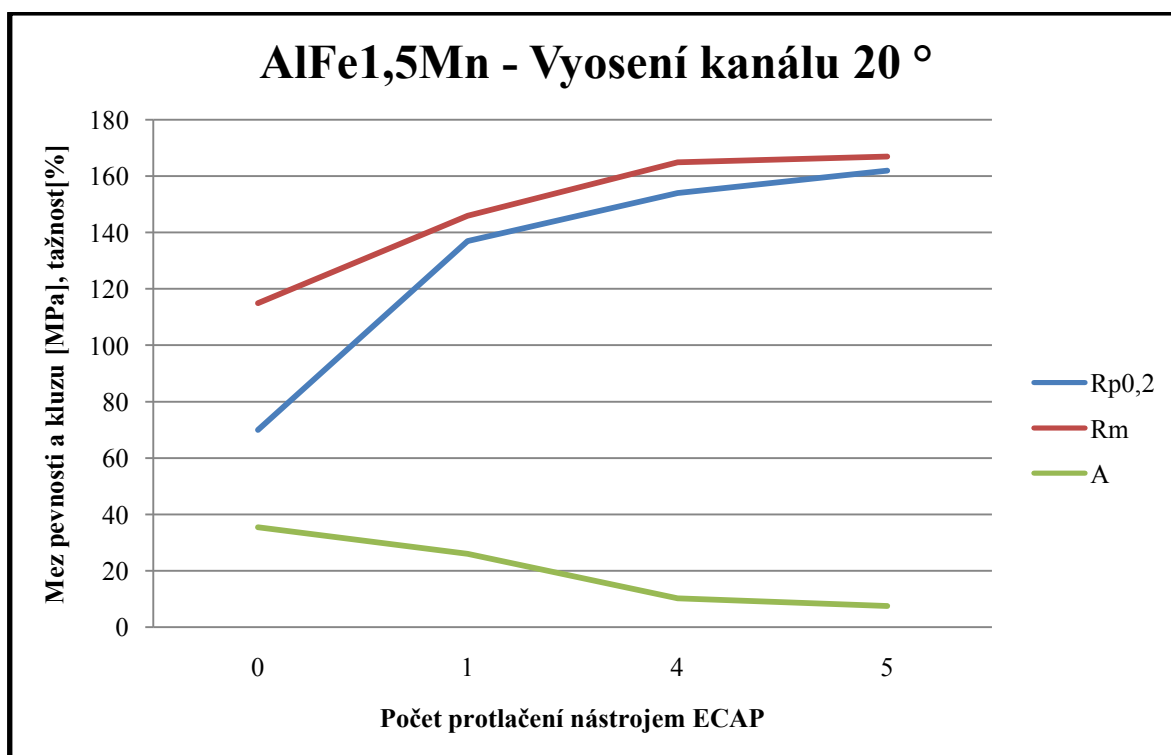
Pro slitinu AlMn1Cu (viz obr. 4.6) a slitinu AlFe1,5Mn (viz obr. 4.7) jsem vytvořil grafy závislosti mechanických vlastností na počtu průchodu nástrojem ECAP. Výrazným a největším zlepšením zkoumaných vlastností dochází již po prvním průchodu, kdy se smluvní mez kluzu zvýší o 100%, mez pevnosti v průměru o 23% a také dojde k největšímu poklesu tažnosti.

Po dalších průchodech nástroje ECAP mez pevnosti, smluvní mez kluzu pozvolna narůstá, naproti tomu dochází k mírnějšímu poklesu tažnosti, nedochází k tak razantnímu zlepšení mechanických vlastností.

Porovnání jsem uvedl pouze pro vyosení kanálu o 20 °, protože při menším vyosení byly změřené hodnoty meze pevnosti v tahu a smluvní meze kluzu menší.



Obr. 4.6 Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti slitiny AlMn1Cu



Obr. 4.7 Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti slitiny AlFe1,5Mn

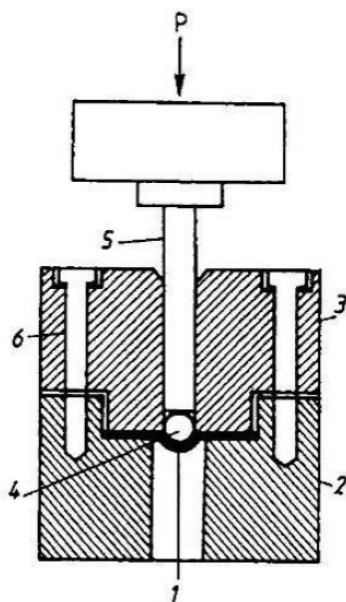
5. Vyhodnocení mechanických vlastností slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn penetrační zkouškou

5.1. Princip penetrační zkoušky

Penetrační zkouškou se dnes převážně řeší pouze záležitosti odhadu meze pevnosti a meze kluzu. Tento odhad se provádí odečtením hodnoty ze zhotovených křivek z tahové a penetrační zkoušky $R_{p0,2} - F_p$ a $R_m - F_m$. Závislost tažnost není doposud dostatečně zmapována.

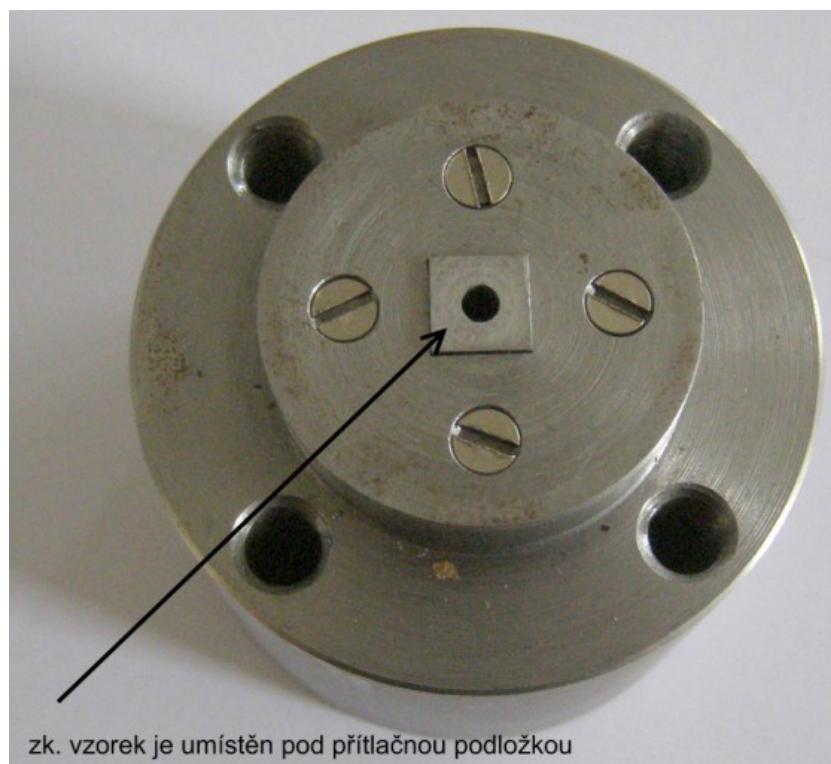
Princip spočívá v průniku kuličky razníku plochým vzorkem (destičkou), který je uchycen mezi horním přidržovačem a dolní matricí (viz obr. 5.2). Schématické uspořádání penetrační zkoušky je znázorněno na obr. 5.1. Při použití poměrně jednoduchého zařízení je možno pomocí registračního snímače zatěžovací síly a hloubky penetrace vzorku získat spolehlivé údaje mechanických vlastností dané při běžné zkoušce v tahu (zatížení na mezi kluzu, zatížení na mezi pevnosti s odpovídající deformací).

V praxi je tato metoda rozšířená a zkoušení se provádí na kovových materiálech a plastech. Nicméně zkoušení UFG materiálů rozšířeno příliš není.



Obr. 5.1 Schématické znázornění penetrační zkoušky,

1 – trn, 2 – spodní díl, 3 – vrchní díl, 4 – přitlačná kulička, 5 – trn



Obr. 5.2 Umístění zkušební vzorku

5.2. Zařízení

Zařízení se skládá z tlačného lože, středícího přípravku, vodícího elementu průtlačníku a samotného průtlačníku (viz obr. 5.3).

Do tlačného lože se vloží zkušební vzorek, který se pomocí šroubů a středícího přípravku přichytí. Na lože se umístí vodící element průtlačníku, který je uchycen čtyřmi šrouby. Hlavní pohyb (svislý) koná průtlačník, který je napojen na citlivý snímač, který zaznamenává potřebné údaje, které počítačový program převede na graf závislosti síly a hloubky penetrace. Měření proběhlo na stejném zařízení jako tahová zkouška krátkých vzorků (Tira Test 2300). Sestava zkušebního zařízení je uvedena na obr. 5.4.



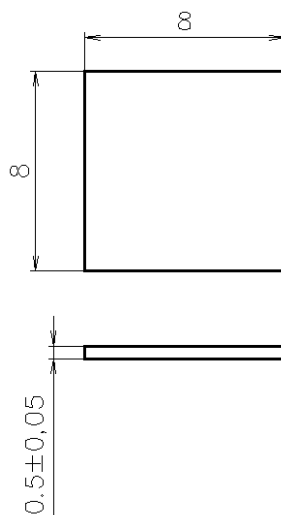
Obr. 5.3 Části zařízení, 1 – tlačné lože, 2 – středící přípravek, 3 – přítlačné podložky, 4 – vodící element průtlačníku, 5 - průtlačník



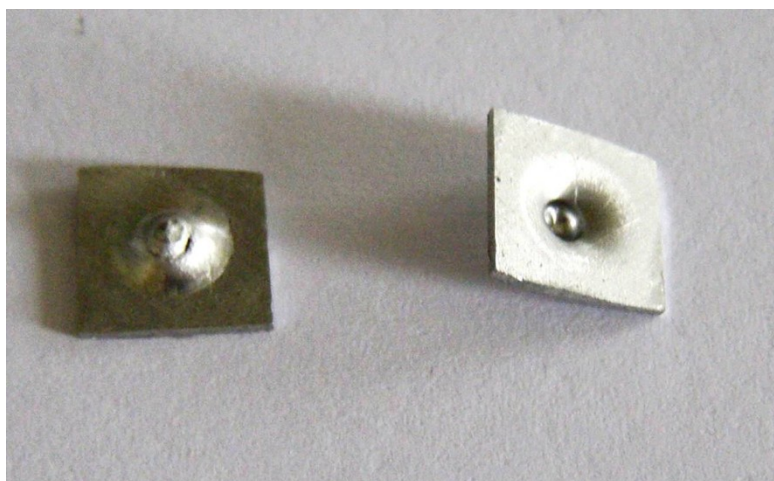
Obr. 5.4 Sestava zařízení

5.3. Vzorky

K penetrační zkoušce byly použity destičky obdélníkového průřezu vyrobené ze slitin AlFe1,5Mn a AlMn1Cu. Vzorky byly vyrobeny dobrušováním s vysokými nároky na rozměrovou přesnost. Výhodou takto malých vzorků je finanční úspora a nenáročnost na zkušební stroje, bez ohledu na přesnost. Zkušební vzorek navržený a odzkoušený VÚHŽ a. s. je uveden na obr. 5.5. Vzorky po zkoušce jsou znázorněny na obr. 5.6.



Obr. 5.5 Rozměry zkušebního vzorku



Obr. 5.6 Vzorky po zkoušce

5.4. Slitina AlMn1Cu

Podrobněji byly vlastnosti této slitiny popsány v kapitole 4. Nyní jsem se zaměřil na výsledky penetrační zkoušky, kde jsem sledoval závislost síly na hloubce penetrace zkoušeného vzorku. Z grafů průběhů zkoušek jsem určil sílu charakterizující přechod z lineární části do okamžiku spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku F_p a sílu na mezi pevnosti F_m . Tyto hodnoty jsou analogicky podobné s výsledky tahové zkoušky. Z důvodů velkých finančních nákladů na výrobu vzorků byla provedena penetrační zkouška pouze u výchozího stavu materiálu a s 10° , 20° vyosením kanálu (viz tab. 6). Mechanické vlastnosti jsem určoval pro výchozí vzorky (bez protlačení).

Tab. 6 Výsledky penetrační zkoušky pro slitinu AlMn1Cu

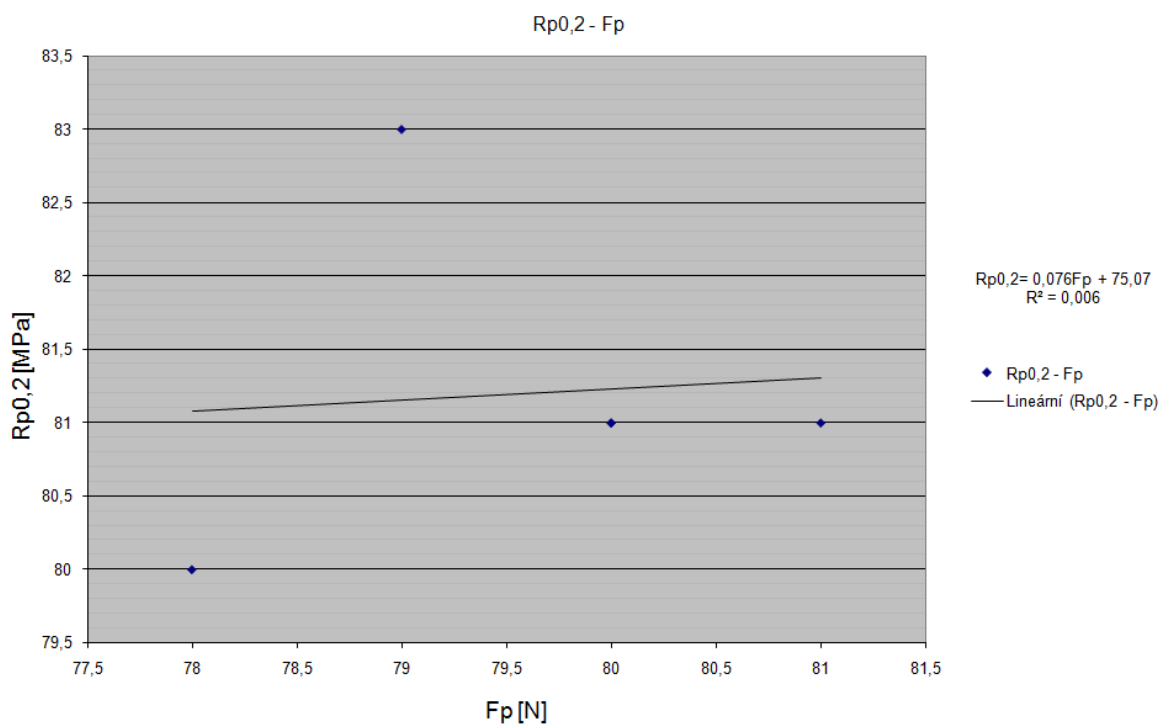
| Materiál | Vyosení kanálu | Počet průchodů | F_{\max} [N] | F_p [N] | d_{\max} [mm] | F_b [%] | d_f [mm] |
|----------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------------|-----------|------------|
| AlMn1Cu | výchozí stav | 0 | 386 | 81 | 1,80 | 194 | 2,11 |
| | | | 383 | 78 | 1,69 | 187 | 2,09 |
| | | | 386 | 80 | 1,78 | 192 | 2,10 |
| | | | 384 | 79 | 1,71 | 191 | 2,12 |
| | | | 386 | 80 | 1,78 | 193 | 2,10 |
| | 10° | 1 | 344 | --- | 1,61 | 173 | 2,08 |
| | | 4 | 381 | --- | 1,50 | 191 | 1,93 |
| | | 5 | 531 | --- | 1,35 | 266 | 1,82 |
| | 20° | 1 | 408 | 147 | 1,60 | 204 | 2,10 |
| | | 4 | 423 | 153 | 1,56 | 212 | 1,95 |
| | | 5 | 487 | 155 | 1,59 | 244 | 1,99 |

- F_{\max} - maximální síla předcházející penetraci
- F_p - síla charakterizující přechod z lineární části do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku
- d_{\max} - protažení vzorku při max. síle předcházející penetraci vzorku
- F_b - síla při penetraci (dolomení)
- d_f - protažení vzorku při síle odpovídající penetraci (dolomení)

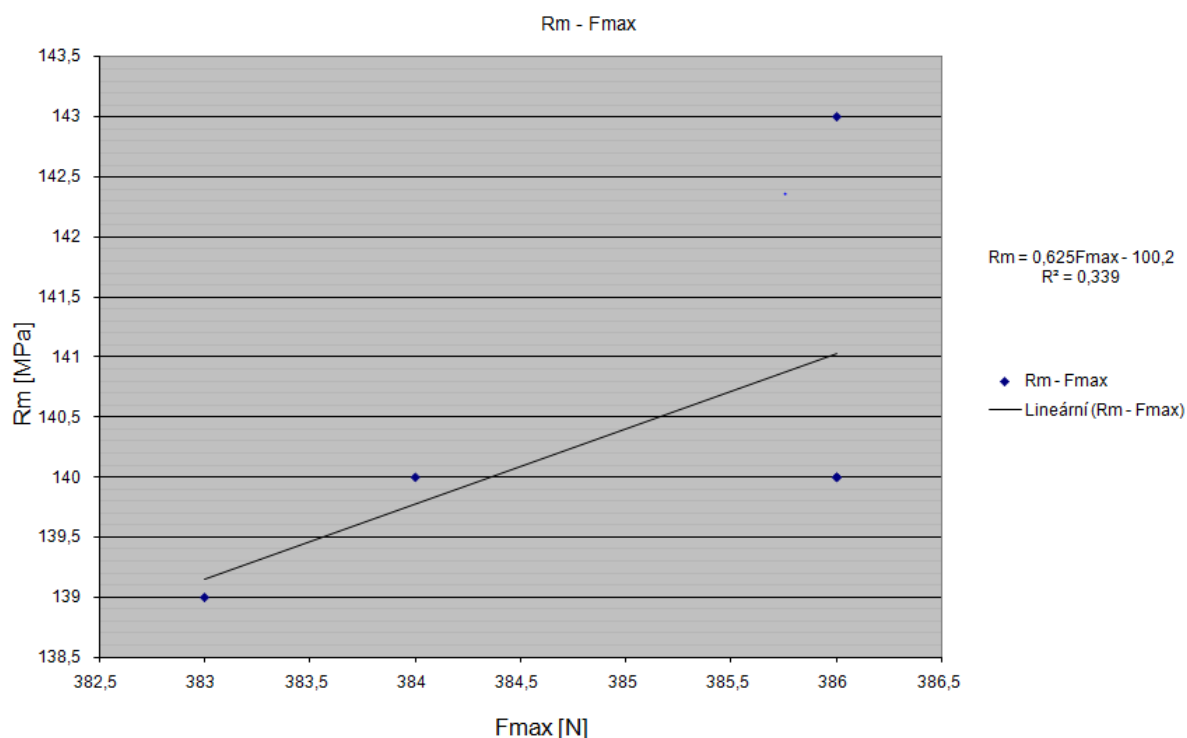
Sestrojil jsem korelační grafy pevnostních závislostí $R_{p0,2}$ na síle charakterizující přechod z lineární části do části spojované s rozvojem plastické deformace F_p (viz obr. 5.7) a závislostí meze pevnosti v tahu R_m na max. síle penetrace F_{max} (viz obr. 5.8). Tyto grafy byly vytvořeny z tahové zkoušky klasických vzorků (viz tab. 7) a z výsledků penetrační zkoušky (viz tab. 6).

Tab. 7 Výsledky tahové zkoušky klasických vzorků

| vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] |
|--------|---------------------|----------------|----------|
| 1 | 81 | 143 | 30,1 |
| 2 | 80 | 139 | 30,4 |
| 3 | 81 | 140 | 29,9 |
| 4 | 83 | 140 | 29,6 |
| 5 | 81 | 140 | 29,9 |



Obr. 5.7 Graf závislosti $R_{p0,2}$ na F_p



Obr. 5.8 Graf závislosti R_m na F_{max}

VYHODNOCENÍ

Z naměřených hodnot (viz tab. 6) lze konstatovat, že předpokládaný nárůst pevnosti se odpovídajícím způsobem projevil na nárůstu max. síly (F_{max}) a také síly při úplné penetraci vzorku (F_b), včetně odpovídajících změn průhybů vzorků na hodnotách odpovídajících sil. Výsledky těchto sil jsem analogicky ztotožnil s výsledky tahové zkoušky klasických vzorků a sestrojil regresní přímky, ze kterých lze odečtením určit mechanické vlastnosti z penetrační zkoušky. Z daných vztahu $R_m = 0,625F_{max} - 100,2$ a $R_{p0,2} = 0,076F_p + 75,07$ (součást grafů) lze určit číselnou hodnotu mechanických vlastností. Výsledky penetrační zkoušky jsou znázorněny v tab. 8.

Tab. 8 Výsledné mechanické vlastnosti slitiny AlMn1Cu

| vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | F_p [MPa] | R_m [MPa] | F_{max} [N] |
|--------|---------------------|----------------|----------------|------------------|
| 1 | 81,23 | 81 | 141,05 | 386 |
| 2 | 81,00 | 78 | 139,02 | 383 |
| 3 | 81,15 | 80 | 141,05 | 386 |
| 4 | 81,07 | 79 | 139,80 | 384 |
| 5 | 81,15 | 80 | 141,05 | 386 |

5.5. Slitina AlFe1,5Mn

Podrobněji byly vlastnosti této slitiny popsány v kapitole 4. Stejně jako u předchozí slitiny jsem se zaměřil na výsledky penetrační zkoušky, kde jsem sledoval závislost síly na hloubce penetrace zkoušeného vzorku. Postup určování mechanických vlastností je stejný jako u slitiny AlMn1Cu. Tyto hodnoty jsou analogicky podobné s výsledky tahové zkoušky. Penetrační zkoušku jsem provedl na vzorcích slitiny AlFe1,5Mn bez protlačení, a vzorcích které byly protlačeny 1, 4 a 5 průchodem s vyosením 0 ° a 20 °. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 8 Výsledky penetrační zkoušky pro slitinu AlFe1,5Mn

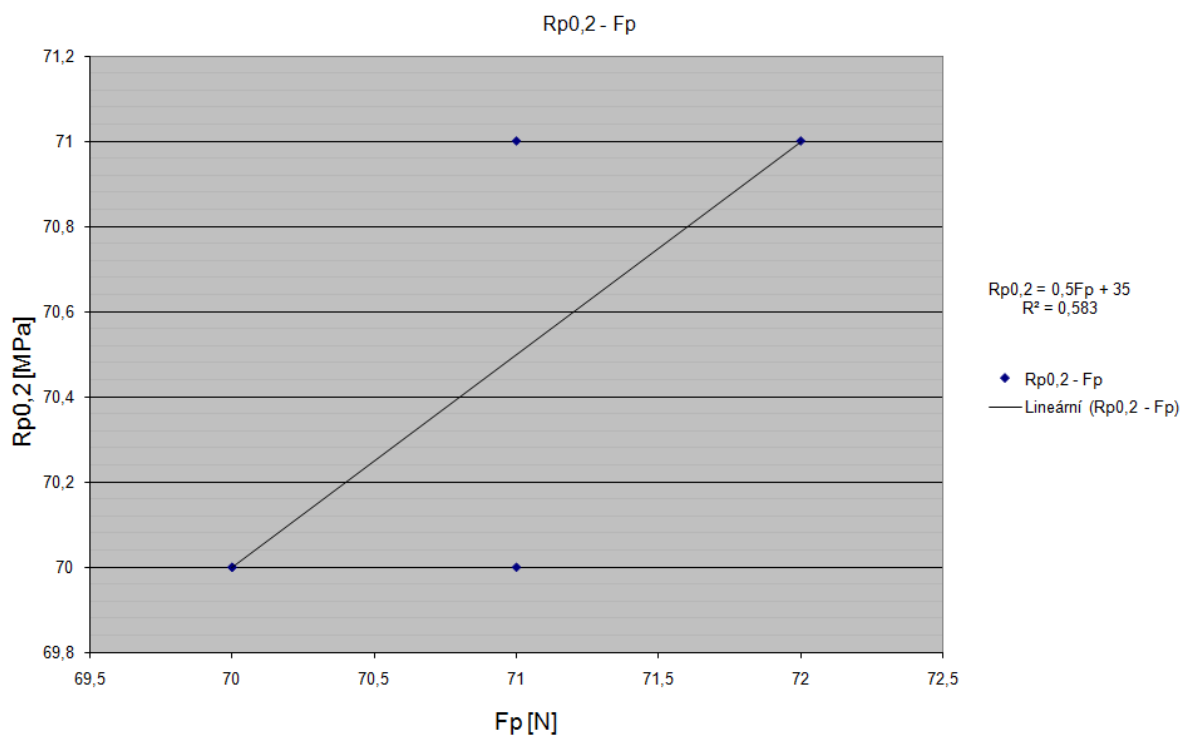
| Materiál | Vyosení kanálu | Počet průchodů | F_{\max} [N] | F_p [N] | d_{\max} [mm] | F_b [%] | d_f [mm] |
|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------------|-----------|------------|
| AlFe1,5Mn | výchozí stav | 0 | 335 | 70 | 1,64 | 162 | 2,12 |
| | | | 344 | 72 | 1,77 | 165 | 2,07 |
| | | | 340 | 71 | 1,69 | 163 | 2,13 |
| | | | 337 | 70 | 1,66 | 163 | 2,12 |
| | | | 342 | 71 | 1,73 | 164 | 2,14 |
| | 0° | 1 | 357 | --- | 1,57 | 173 | 2,08 |
| | | 4 | 437 | --- | 1,59 | 191 | 1,93 |
| | | 5 | 490 | --- | 1,90 | 266 | 1,82 |
| | 20° | 1 | 433 | 130 | 1,62 | 217 | 2,06 |
| | | 4 | 440 | 155 | 1,53 | 220 | 1,96 |
| | | 5 | 528 | 163 | 1,59 | 265 | 2,06 |

- F_{\max} - maximální síla předcházející penetraci
- F_p - síla charakterizující přechod z lineární části do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku
- d_{\max} - protažení vzorku při max. síle předcházející penetraci vzorku
- F_b - síla při penetraci (dolomení)
- d_f - protažení vzorku při síle odpovídající penetraci (dolomení)

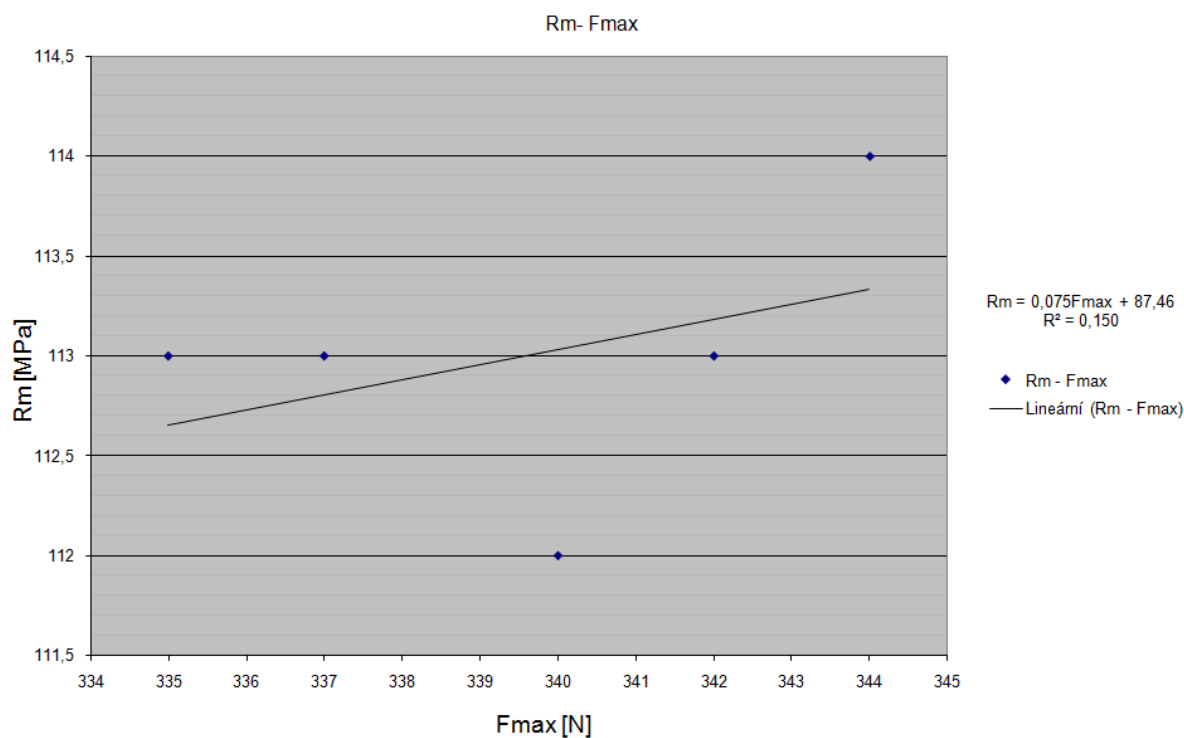
Stejně jako u předchozí slitiny jsem sestrojil korelační grafy závislosti $R_{p0,2}$ na síle charakterizující přechod z lineární části do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku u penetrační zkoušky F_p (viz obr. 5.9) a závislosti meze pevnosti v tahu R_m na max. síle penetrace F_{max} (viz obr. 5.10). Grafy jsem sestrojil analogickým hodnocením tahové zkoušky klasických vzorků a pomocí výsledků penetrační zkoušky.

Tab. 9 Výsledky tahové zkoušky klasických vzorků

| vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] |
|--------|---------------------|----------------|----------|
| 1 | 70 | 113 | 35,5 |
| 2 | 71 | 114 | 35,3 |
| 3 | 70 | 112 | 36,5 |
| 4 | 70 | 113 | 35,7 |
| 5 | 71 | 113 | 35,5 |



Obr. 5.9 Graf závislosti $R_{p0,2}$ na F_p



Obr. 5.10 Graf závislosti R_m - F_{max}

VYHODNOCENÍ

Z naměřených hodnot (viz tab. 7) vyplývá podobný růst max. síly a také síly při úplné penetraci vzorku v závislosti na hloubce penetrace jak u slitiny AlMn1Cu. Výsledky těchto sil jsem analogicky ztotožnil s výsledky tahové zkoušky klasických vzorků a sestrojil korelační grafy, ze kterých jsem určil regresní přímku a výpočtový vztah. Pomocí regresní přímky, lze určit přibližnou hodnotu dané mechanické vlastností, což je méně přesné než pomocí vztahu, kterým lze určit velice přesné hodnoty mechanických vlastností a které jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Výsledné mechanické vlastnosti slitiny AlFe1,5Mn

| vzorek | $R_{p0,2}$ [MPa] | F_p [MPa] | R_m [MPa] | F_{max} [N] |
|--------|---------------------|----------------|----------------|------------------|
| 1 | 70,00 | 70 | 112,59 | 335 |
| 2 | 71,00 | 72 | 113,26 | 344 |
| 3 | 70,50 | 71 | 112,96 | 340 |
| 4 | 70,00 | 70 | 112,74 | 337 |
| 5 | 70,50 | 71 | 113,11 | 342 |

6. Celkové vyhodnocení

Provedl jsem tahovou zkoušku na krátkých vzorcích slitiny AlMn1Cu a AlFe1,5Mn a vyhodnotil jejich mechanické vlastnosti. Zároveň byl prokázán vliv počtu průchodů nástrojem ECAP na zlepšení mechanických vlastností již po prvním průchodu nástrojem ECAP.

Pomocí moderní výpočetní techniky a citlivých snímačů, bylo jednoduché určit základní mechanické vlastnosti obou slitin využitím tahové zkoušky krátkých vzorků. Výsledné hodnoty byly počítačovým programem vykresleny do grafů a z nich následně převedeny do číselné podoby mechanických vlastností.

Dále jsem pro stejné slitiny zjišťoval mechanické vlastnosti penetrační metodou. Vyhodnocení bylo již složitější, protože nelze stanovit hodnoty mechanických vlastností přímo z naměřených hodnot, ale je zapotřebí analogicky porovnat hodnoty s tahovou zkouškou klasických vzorků. Takovýmto postupem je možné snadno stanovit převodní vztahy $R_m = 0,625F_{\max} - 100,2$ a $R_{p0,2} = 0,076F_p + 75,07$ pro slitinu AlMn1Cu, vztahy pro slitinu AlFe1,5Mn $R_m = 0,075F_{\max} + 87,46$ a $R_{p0,2} = 0,5F_p + 35$ (k určení smluvní meze kluzu a meze pevnosti v tahu z grafů průběhů penetračních zkoušek a jejich přesnou hodnotu.

V tab. 11 jsem porovnal výsledné mechanické vlastnosti u klasické tahové zkoušky, tahové zkoušky krátkých vzorků a penetrační zkoušky. Výsledky daných zkoušek se velmi k sobě přibližují, což dokazuje vysokou přesnost měření daných metod.

Tab. 11 Srovnání výsledků mechanických vlastností

| Mechanická vlastnost | Materiál | | | | | |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| | AlMn1Cu | | | AlFe1,5Mn | | |
| | Tahová zkouška klasických vzorků | Tahová zkouška krátkých vzorků | Penetrační zkouška | Tahová zkouška klasických vzorků | Tahová zkouška krátkých vzorků | Penetrační zkouška |
| R_m [MPa] | 140 | 140 | 140,39 | 113 | 115 | 112,93 |
| $R_{p0,2}$ [MPa] | 81 | 80 | 81,12 | 70 | 70 | 70,40 |
| A [%] | 29,9 | 30 | --- | 35,5 | 35,5 | --- |

ZÁVĚR

V teoretické části jsem podrobně charakterizoval nástroj ECAP a zaměřil jsem se na vyhodnocování mechanických vlastností nejpoužívanějšími metodami jak pro rozměrové klasické vzorky, tak i na trend dnešní doby, vzorky zmenšených rozměrů. Popsal jsem rešerši současného stavu vývoje technologií pro zjemňování struktury kovových materiálů.

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení mechanických vlastností slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn tahovou zkouškou krátkých vzorků a penetrační metodou. Díky vstřícnosti firmy VÚHŽ a. s. mi byla umožněna účast u těchto zkoušek a mohl jsem si sám vyzkoušet princip měření. Z důvodů velké finanční náročnosti výroby vzorků u penetrační metody nebylo možné vyhodnotit mechanické vlastnosti po různých počtech průchodů nástrojem ECAP, protože k vyhodnocení jsou zapotřebí min. 3 výsledky měřené vlastnosti. V laboratořích VÚHŽ se u penetrační zkoušky provádělo pouze jedno měření po 1, 4 a 5 průchodech s různým vyosením kanálu a 5 měření u výchozího stavu obou slitin.

Z výsledků lze konstatovat, že použité metody jsou výborným předpokladem k dalšímu prohlubování znalostí v tomto směru, díky shodě a lze říci, že se jedná o jednoduché principy, kterými lze určit mechanické vlastnosti na velmi malých vzorcích v porovnání s klasickými. Daná nová metodika plně vyhovuje potřebám provádění zkoušek mechanických vlastností na krátkých vzorcích. Dosažené výsledky plně korelují s výsledky dosaženými klasickými mechanickými zkouškami. Tímto byly vytvořeny velmi dobré předpoklady pro širší použití dané metodiky v laboratorním zkoušení nových materiálů. Nevýhodou je prvotní investice do nákladných zařízení a kusová výroba zkušebních vzorků.

Poděkování

Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc. za cenné připomínky, pak panu Ing. Vítu Michenkovi a panu prof. Janu Dutkiewiczemu za jejich vstřícnost a ochotu při řešení celé problematiky. V neposlední řadě také spolužákům a rodičům za podporu a pomoc.

Seznam použité literatury

- [1] Silbernagel, A. *Struktura a vlastnosti kovových materiálů*, Ostrava, 2004
- [2] SRINIVASAN R., CHAUDHUR P. K., CHERUKURI B., HAN Q., SWENSON D., Gros P. Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys, Final Technical Report, DOE Award Number: DE-FC36-01ID14022, 2006, p. 1- 68.
- [3] YOON, S. CH., JEONG, Y. G., HONG, S. I., CHUN, B. S., LEE, H. R., BAIK, K. H., KIM, H. S. Processing Conditions and Mechanical Properties of Fine Grained Mg by Equal Channel Angular Pressing, *Key Engineering Materials*, Vols. 340-341, 913 (2007), p. 913-917.
- [4] NAKASHIMA, K., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal – channel angular dressing. *Acta Materialia*, 2 March 1998, vol. 46, no. 5, s. 1589-1599.
- [5] URL: <<http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/mechanicke-zkouseni-kovu-m10507p3.html>> [cit. 2010-5-18]
- [6] GROS, P., HAN, Q., CHAUDHURY, P. K., CHERUKURI, B., SRINIVASAN (PI), R., SWENSON, D. Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys, *Final Technical Report*, (2006), p.68.
- [7] URL: <http://www.345.vsb.cz/KE%20vyuka/Rusz/Moderni_metody_ve_tvareni_sylaby.pdf> [cit. 2010-5-18]
- [8] URL: <<http://www.nanotechnologie.cz/storage/B17.pdf>> [cit. 2010-5-18]
- [9] URL: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2001/sbornik/papers/70.pdf>> [cit. 2010-5-18]
- [10] URL: <<http://www.mete.metu.edu.tr/people/33/>> [cit. 2010-5-18]

Seznam příloh

- [1] Médium s prací v elektronické podobě